

Na prawach rękopisu

**POLITECHNIKA WROCŁAWSKA**  
**INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ I MECHANIKI PŁYNÓW**

Raport serii **PREPRINTY** nr 12/2003

**STABILIZACJA  
PŁOMIENIA PYŁOWEGO  
PLAZMĄ**

Arkadiusz DYJAKON

Słowa kluczowe: paliwo stałe,  
plazma,  
zapłon,  
stabilność płomienia

Grant KBN Nr 8T10B02921

Praca doktorska

Promotor: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kordylewski

WROCŁAW 2003

## Spis treści

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Wykaz ważniejszych oznaczeń .....                                            | 6  |
| 1. Wstęp .....                                                               | 9  |
| 2. Plazma w procesach spalania .....                                         | 10 |
| 2.1. Właściwości plazmy .....                                                | 10 |
| 2.2. Generatory plazmy .....                                                 | 11 |
| 2.2.1. Typy plazmotronów .....                                               | 11 |
| 2.2.2. Elektrody plazmotronów .....                                          | 13 |
| 2.2.3. Gazy robocze plazmotronów .....                                       | 15 |
| 2.2.4. Zasilanie elektryczne plazmotronów .....                              | 15 |
| 2.3. Zastosowanie plazmy w technice spalania .....                           | 16 |
| 2.3.1. Plazmowe układy zapłonowe .....                                       | 16 |
| 2.3.2. Zastosowanie plazmy do zmniejszenia emisji zanieczyszczeń .....       | 18 |
| 2.3.3. Modyfikacja paliw za pomocą wyładowań elektrycznych .....             | 19 |
| 3. Stabilizacja płomieni pyłowych .....                                      | 21 |
| 3.1. Zapłon mieszaniny pyłowo – powietrznej .....                            | 21 |
| 3.2. Gaśnięcie płomieni .....                                                | 22 |
| 3.3. Charakter płomieni pyłowych .....                                       | 24 |
| 3.4. Sposoby stabilizacji płomieni pyłowych .....                            | 25 |
| 3.5. Stabilizacja płomieni wyładowaniami elektrycznymi .....                 | 27 |
| 3.5.1. Wpływ pola elektrycznego na stabilność płomieni gazowych .....        | 27 |
| 3.5.2. Stabilizacja płomienia wyładowaniem koronowym .....                   | 28 |
| 3.6. Stabilizacja płomieni pyłowych plazmą .....                             | 28 |
| 3.6.1. Mechanizm plazmowego zapłonu pyłu węglowego .....                     | 29 |
| 3.6.2. Plazmowe palniki pyłowe .....                                         | 29 |
| 4. Plazmowy rozruch kotłów pyłowych .....                                    | 31 |
| 4.1. Rozruch kotła pyłowego .....                                            | 31 |
| 4.1.1. Uruchamianie kotła ze stanu zimnego .....                             | 32 |
| 4.1.2. Uruchamianie kotła ze stanu gorącego .....                            | 33 |
| 4.2. Straty rozruchowe bloku .....                                           | 34 |
| 4.2.1. Przykład strat rozruchowych bloku w <i>Elektrowni Bełchatów</i> ..... | 34 |
| 4.3. Plazmowy rozruch kotła pyłowego .....                                   | 35 |
| 4.3.1. Umieszczenie plazmotronu w palniku pyłowym .....                      | 36 |



|                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.2. Rozmieszczenie plazmowych palników pyłowych w kotle pyłowym .....                                                                                                                                                               | 36 |
| 4.3.3. Przygotowanie pyłu węglowego do plazmowego rozruchu kotła<br>pyłowego .....                                                                                                                                                     | 37 |
| 4.4. Wady i zalety plazmowego systemu rozruchu kotłów pyłowych .....                                                                                                                                                                   | 39 |
| 5. Cele i tezy pracy .....                                                                                                                                                                                                             | 40 |
| 6. Charakterystyka paliw użytych w badaniach, stanowisko badawcze i<br>aparatura pomiarowa .....                                                                                                                                       | 41 |
| 6.1. Charakterystyka paliw .....                                                                                                                                                                                                       | 41 |
| 6.1.1. Przygotowanie paliw do badań nad wpływem wyładowań koronowych<br>na zapłon pyłu węglowego .....                                                                                                                                 | 41 |
| 6.1.2. Przygotowanie paliw do badań nad wpływem plazmy termicznej na<br>zapłon i stabilizację płomienia pyłowego .....                                                                                                                 | 42 |
| 6.1.3. Przygotowanie koksów do badań wpływu części lotnych na zakres<br>pracy w plazmowym palniku pyłowym .....                                                                                                                        | 42 |
| 6.2. Opis stanowisk badawczych i warunków badań .....                                                                                                                                                                                  | 44 |
| 6.2.1. Opis stanowiska badawczego i warunków badań nad wpływem<br>wyładowań koronowych na zapłon pyłu węglowego .....                                                                                                                  | 45 |
| 6.2.2. Opis stanowiska badawczego i warunków badań nad wpływem mocy<br>elektrycznej plazmotronu $N_{el}$ oraz rodzaju i właściwości paliw na<br>charakterystyki plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego<br>i strumieniowego ..... | 48 |
| 6.3. Plazmotrony użyte w badaniach .....                                                                                                                                                                                               | 50 |
| 6.4. Palniki pyłowe użyte w badaniach .....                                                                                                                                                                                            | 52 |
| 6.5. Plazmowe palniki pyłowe użyte w badaniach .....                                                                                                                                                                                   | 53 |
| 6.6. Instalacja elektryczna plazmotronu .....                                                                                                                                                                                          | 54 |
| 6.7. Aparatura pomiarowa .....                                                                                                                                                                                                         | 56 |
| 6.7.1. Aparatura pomiarowa użyta do badań wpływu wyładowań koronowych<br>na zapłon pyłu węglowego .....                                                                                                                                | 56 |
| 6.7.2. Aparatura pomiarowa użyta do badań wpływu mocy elektrycznej<br>plazmotronu $N_{el}$ na charakterystyki plazmowego palnika pyłowego typu<br>cyklonowego i strumieniowego .....                                                   | 56 |
| 7. Wpływ wyładowań koronowych na zapłon pyłu węglowego .....                                                                                                                                                                           | 58 |
| 7.1. Wyniki pomiarów .....                                                                                                                                                                                                             | 58 |
| 7.2. Dyskusja .....                                                                                                                                                                                                                    | 60 |

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.2.1. Wpływ pola elektrycznego .....                                                                                                                  | 60 |
| 7.2.2. Wpływ ozonu .....                                                                                                                               | 62 |
| 7.3. Podsumowanie .....                                                                                                                                | 62 |
| 8. Plazmowy zapłon i stabilizacja płomienia pyłowego .....                                                                                             | 64 |
| 8.1. Podstawowe charakterystyki pracy plazmowego palnika pyłowego typu<br>cyklonowego .....                                                            | 65 |
| 8.1.1. Analiza stabilności plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego ...                                                                            | 67 |
| 8.2. Interpretacja matematyczna wyników badań doświadczalnych .....                                                                                    | 71 |
| 8.2.1. Model .....                                                                                                                                     | 72 |
| 8.2.2. Równanie bilansowe .....                                                                                                                        | 72 |
| 8.2.3. Analiza rozwiązań i ich interpretacja .....                                                                                                     | 74 |
| 8.3. Podsumowanie .....                                                                                                                                | 75 |
| 9. Wpływ warunków zasilania oraz rodzaju i właściwości paliw na charakterystyki<br>plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego i strumieniowego ..... | 76 |
| 9.1. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu $N_{el}$ i współczynnika nadmiaru<br>powietrza $\lambda$ na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego .....    | 76 |
| 9.1.1. Zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego .....                                                                                 | 76 |
| 9.1.2. Zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego .....                                                                              | 79 |
| 9.2. Wpływ rodzaju paliwa .....                                                                                                                        | 81 |
| 9.2.1. Kryterium klasyfikacji paliw do plazmowych palników pyłowych .....                                                                              | 82 |
| 9.3. Wpływ właściwości fizykochemicznych paliwa .....                                                                                                  | 84 |
| 9.3.1. Wpływ części lotnych .....                                                                                                                      | 85 |
| 9.3.2. Wpływ substancji mineralnej .....                                                                                                               | 86 |
| 9.3.3. Wpływ wilgotności .....                                                                                                                         | 87 |
| 9.3.4. Wpływ rozdrobnienia paliwa stałego .....                                                                                                        | 88 |
| 9.4. Dyskusja wyników .....                                                                                                                            | 90 |
| 10. Właściwości płomieni pyłowych generowanych w plazmowych palnikach<br>pyłowych typu cyklonowego i strumieniowego .....                              | 91 |
| 10.1. Stanowisko do badań płomienia pyłowego stabilizowanego plazmą .....                                                                              | 91 |
| 10.2. Wpływ warunków zasilania plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego<br>na umowną długość płomienia pyłowego $L_{500}$ .....                    | 92 |
| 10.3. Rozkłady temperatury w płomieniu pyłowym – plazmowy palnik pyłowy<br>typu cyklonowego .....                                                      | 93 |
| 10.4. Wpływ warunków zasilania plazmowego palnika pyłowego typu                                                                                        |    |

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| strumieniowego na <i>umowną długość płomienia pyłowego</i> $L_{500}$ .....                                         | 96  |
| 10.5. Rozkłady temperatury w płomieniu pyłowym – plazmowy palnik pyłowy<br>typu strumieniowego .....               | 97  |
| 10.6. Analiza wyników .....                                                                                        | 99  |
| 11. Emisja zanieczyszczeń z plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego<br>i strumieniowego .....                 | 101 |
| 11.1. Opis stanowiska badawczego do badań emisji zanieczyszczeń płomieni<br>pyłowych stabilizowanych plazmą .....  | 101 |
| 11.2. Emisja tlenku azotu $NO$ .....                                                                               | 102 |
| 11.3. Emisja tlenku węgla $CO$ .....                                                                               | 103 |
| 11.4. Emisja dwutlenku węgla $CO_2$ .....                                                                          | 105 |
| 11.5. Stopień wypalenia .....                                                                                      | 106 |
| 11.6. Podsumowanie .....                                                                                           | 108 |
| 12. Modelowanie numeryczne działania plazmowego palnika pyłowego .....                                             | 110 |
| 12.1. Numeryczna reprezentacja geometrii plazmowego palnika pyłowego<br>typu strumieniowego .....                  | 110 |
| 12.2. Strategia modelowania .....                                                                                  | 112 |
| 12.2.1. Obliczenia dla fazy stałej .....                                                                           | 112 |
| 12.2.2. Obliczenia dla fazy gazowej .....                                                                          | 113 |
| 12.3. Wyniki modelowania numerycznego .....                                                                        | 114 |
| 12.3.1. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu $N_{el}$ na cechy płomienia z<br>plazmowego palnika pyłowego .....     | 114 |
| 12.3.2. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda$ na cechy płomienia z<br>plazmowego palnika pyłowego ..... | 116 |
| 12.3.3. Wpływ mocy cieplnej palnika $N_t$ na cechy płomienia z<br>plazmowego palnika pyłowego .....                | 118 |
| 12.3.4. Wpływ rodzaju paliwa na zakres pracy plazmowego palnika<br>pyłowego .....                                  | 119 |
| 12.4. Symulacja numeryczna kryterium stabilności plazmowego palnika pyłowego ..                                    | 119 |
| 12.5. Analiza wyników .....                                                                                        | 120 |
| 13. Dyskusja wyników .....                                                                                         | 121 |
| 14. Podsumowanie i wnioski końcowe .....                                                                           | 126 |
| Literatura .....                                                                                                   | 128 |
| Załączniki .....                                                                                                   | 136 |

## Wykaz ważniejszych oznaczeń:

|              |                                                                                                                                 |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A^a$        | – zawartość popiołu w stanie analitycznym, % wagowo                                                                             |
| $A_o^d$      | – zawartość popiołu w stanie suchym, % wagowo                                                                                   |
| $A_1^d$      | – zawartość popiołu w pozostałości koksowej w stanie suchym, % wagowo                                                           |
| $B$          | – bezwymiarowy przyrost temperatury                                                                                             |
| $B_c$        | – stopień wypalenia, %                                                                                                          |
| $C^a$        | – zawartość pierwiastka węgla w paliwie w stanie analitycznym, % wagowo                                                         |
| $c$          | – koncentracja, udział, $\text{kg/m}^3$                                                                                         |
| $c_p$        | – pojemność cieplna właściwa przy stałym ciśnieniu, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$                                        |
| $D$          | – współczynnik dyfuzji<br>– średnica wewnętrzna plazmowego palnika pyłowego, m                                                  |
| $Da$         | – liczba <i>Damkoehlera</i>                                                                                                     |
| $\tilde{Da}$ | – analog liczby <i>Damkoehlera</i> , $\text{m}^{-1}$                                                                            |
| $d$          | – średnica wylotowa plazmowego palnika pyłowego, m<br>– rozmiar geometryczny ciała nieopływowego, m                             |
| $d_k$        | – średnica wewnętrzna komory aparatu <i>Godberta – Greenwalda</i> , m                                                           |
| $d_o$        | – średnica cząstki, m                                                                                                           |
| $d_{sr}$     | – średni rozmiar cząstki, m                                                                                                     |
| $d_w$        | – średnica wewnętrzna przewodu wlotowego, m                                                                                     |
| $dp/dt$      | – prędkość narostu ciśnienia, $\text{MPa/s}$                                                                                    |
| $E$          | – energia cząstki przy założeniu, że $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ , J<br>– energia aktywacji, $\text{J/mol}$           |
| $E_{\min}$   | – minimalna energia zapłonu, J                                                                                                  |
| $F_w$        | – powierzchnia cząstki węglowej, $\text{m}^2$                                                                                   |
| $FC^a$       | – udział stałej części palnej w węglu w stanie analitycznym, % wagowo                                                           |
| $FR^a$       | – wskaźnik paliwowy w stanie analitycznym                                                                                       |
| $H^a$        | – zawartość wodoru w paliwie w stanie analitycznym, % wagowo                                                                    |
| $h_k$        | – wysokość komory aparatu <i>Godberta – Greenwalda</i> , m                                                                      |
| $I$          | – bezwymiarowa gęstość energii generowanej przez strumień plazmy                                                                |
| $K_{st}$     | – współczynnik wybuchowości pyłów, $\text{MPa}\cdot(\text{m/s})$                                                                |
| $k$          | – stała szybkości reakcji, wymiar zależny od rzędu reakcji<br>– stała <i>Boltzmann</i> $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ , $\text{J/K}$ |

|              |                                                                                                                       |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $k_0$        | – współczynnik przedeksponencjalny, 1/s                                                                               |
| $L_{500}$    | – umowna długość płomienia pyłowego, m                                                                                |
| $m_p$        | – masa pyłu, kg                                                                                                       |
| $m_w$        | – masa cząstki węglowej, kg                                                                                           |
| $N^a$        | – zawartość azotu w paliwie w stanie analitycznym, % wagowo                                                           |
| $N_{el}$     | – moc elektryczna plazmotronu, kW                                                                                     |
| $N_t$        | – moc cieplna palnika, kW                                                                                             |
| $N_{Z500}$   | – potencjał zapłonu, MJ/kg                                                                                            |
| $O^a$        | – zawartość tlenu w paliwie w stanie analitycznym, % wagowo                                                           |
| $p$          | – ciśnienie powietrza, MPa                                                                                            |
| $p_e$        | – maksymalne ciśnienie wybuchu, ciśnienie równowagowe wybuchu, MPa                                                    |
| $p_o$        | – ciśnienie ładunku zapłonowego, ciśnienie początkowe wybuchu, MPa                                                    |
| $Q$          | – efekt cieplny reakcji, J/kg                                                                                         |
| $Q_i^a$      | – wartość opałowa, MJ/kg                                                                                              |
| $Q_s^a$      | – ciepło spalania, MJ/kg                                                                                              |
| $q$          | – strumień ciepła, W                                                                                                  |
| $q_{mw}$     | – strumień masy paliwa, kg/h                                                                                          |
| $q_{mpp}$    | – strumień mieszanki pyłowo – powietrznej, m <sup>3</sup> /h                                                          |
| $q_{vgr}$    | – strumień objętości gazu roboczego, m <sup>3</sup> /h                                                                |
| $q_{vpowI}$  | – strumień objętości powietrza pierwotnego, m <sup>3</sup> /h                                                         |
| $q_{vpowII}$ | – strumień objętości powietrza wtórnego, m <sup>3</sup> /h                                                            |
| $q_v$        | – strumień objętości, m <sup>3</sup> /h                                                                               |
| $R$          | – promień wewnętrzny zbiornika, m<br>– uniwersalna stała gazowa, $R = 8,314159 \text{ (mol} \cdot \text{K)}/\text{J}$ |
| $r$          | – odległość od osi palnika, m                                                                                         |
| $S$          | – powierzchnia reaktora, m <sup>2</sup>                                                                               |
| $S^a$        | – zawartość siarki w paliwie w stanie analitycznym, % wagowo                                                          |
| $S_u$        | – prędkość propagacji płomienia, m/s                                                                                  |
| $T$          | – temperatura, °C                                                                                                     |
| $T_a$        | – temperatura charakterystyczna, °C                                                                                   |
| $T_{max}$    | – temperatura maksymalna płomienia, °C                                                                                |
| $T_{min}$    | – temperatura minimalna płomienia, °C                                                                                 |
| $T_{ot}$     | – temperatura otoczenia, °C                                                                                           |
| $T_x$        | – temperatura lokalna płomienia w ustalonej odległości od wylotu palnika, °C                                          |

|                 |                                                                                  |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $T_y$           | – temperatura lokalna płomienia w ustalonej odległości od osi palnika, °C        |
| $T_z$           | – temperatura zapłonu, °C                                                        |
| $T_{Z150}$      | – temperatura zapłonu pyłu po czasie 150 ms, °C                                  |
| $t$             | – czas, s                                                                        |
| $t_{ch}$        | – charakterystyczny czas reakcji chemicznej, s                                   |
| $t_{ind}$       | – czas indukcji zapłonu, s                                                       |
| $t_N$           | – charakterystyczny czas „niutonowski”, s                                        |
| $t_{res}$       | – średni charakterystyczny czas przebywania reagentów, s                         |
| $V$             | – objętość, m <sup>3</sup>                                                       |
| $V^a$           | – zawartość części lotnych w stanie analitycznym, % wagowo                       |
| $W^a$           | – zawartość wilgoci w stanie analitycznym, % wagowo                              |
| $w$             | – prędkość przepływu, m/s                                                        |
| $x$             | – odległość od wylotu palnika, m                                                 |
| $ZWZ$           | – wskaźnik zapłonu, MJ/(kg·°C)                                                   |
| $\alpha$        | – współczynnik przejmowania ciepła, W/(m <sup>2</sup> ·K)                        |
| $\delta$        | – grubość frontu płomienia, m                                                    |
| $\varepsilon$   | – odwrotność bezwymiarowej energii aktywacji                                     |
| $\gamma$        | – wykładnik adiabaty<br>– bezwymiarowa koncentracja reagentów                    |
| $\lambda$       | – współczynnik nadmiaru powietrza<br>– współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m·K) |
| $\lambda_{max}$ | – maksymalny współczynnik nadmiaru powietrza                                     |
| $\lambda_{min}$ | – minimalny współczynnik nadmiaru powietrza                                      |
| $\theta$        | – bezwymiarowa temperatura                                                       |
| $\rho$          | – gęstość substancji, kg/m <sup>3</sup>                                          |
| $\omega$        | – szybkość reakcji, wymiar zależny od rzędu reakcji                              |

## 1. Wstęp

Niezbędnym wymogiem umożliwiającym uruchomienie palników pyłowych w kotle pyłowym jest doprowadzenie komory paleniskowej do odpowiedniego stanu termicznego. W energetyce zawodowej do rozruchu kotłów pyłowych i fluidalnych zwykle stosuje się palniki olejowe lub rzadziej gazowe, zwane palnikami rozpałkowymi. Rozruch kotła z użyciem palników olejowych zasilanych mazutem bywa jednak uciążliwy dla środowiska naturalnego ze względu na niebezpieczeństwo dymienia spowodowanego emisją sadzy i ciężkich węglowodorów. Instalacja mazutowa elektrowni wymaga ponadto utrzymywania oleju w ciągłym obiegu, co ją komplikuje i podnosi koszty eksploatacji oraz zwiększa zagrożenie wycieku mazutu i skażenia środowiska. Innym zagrożeniem są pożary podgrzewaczy powietrza wywołane zapaleniem się na ich powierzchniach grzejnych osadów ze spalania oleju. Rozpałkowe palniki olejowe uruchamia się także podczas pracy kotła z minimalnym obciążeniem dla podtrzymania płomienia pyłowego.

Stosowanie palników gazowych do procesu rozruchu kotła nie wywołuje znacznej emisji zanieczyszczeń, ale zwiększa koszt wytwarzania energii elektrycznej z powodu wysokiego kosztu gazu ziemnego i rygorystycznych przepisów dotyczących jego przesyłania i użytkowania w instalacjach przemysłowych. Z wymienionych powodów w Polsce praktycznie nie stosuje się „gazowego” rozruchu kotłów pyłowych. W celu rozruchu kotłów pyłowych mniejszej mocy stosuje się także muflowe palniki pyłowe.

Stosowanie palników olejowych lub gazowych w kotłach pyłowych jest więc koniecznością pomimo wymienionych wad i niedogodności. Z punktu widzenia elektrowni węglowych, w obydwu przypadkach, są to instalacje rozruchowe wymagające dodatkowego paliwa, które jest bardziej kosztowne od pyłu węglowego i kłopotliwe w eksploatacji.

Rozwiązaniem powyższych trudności może być zastosowanie „plazmowych” instalacji rozruchowych kotłów pyłowych, które do zapłonu pyłu węglowego wykorzystują plazmę termiczną wytwarzaną w plazmotronie podczas wyładowania łukowego. Plazma ze względu na swoje własności jest źródłem energii o dużej gęstości mocy umożliwiającym, nie tylko pewny zapłon pyłu węglowego, ale również stabilizację płomienia pyłowego. Technicznym rozwiązaniem jest plazmowy palnik pyłowy, który ma zastąpić palnik mazutowy podczas rozruchu kotła i podtrzymania płomienia pyłowego przy niskim obciążeniu komory paleniskowej.

Perspektywa możliwości zastosowania plazmotronów do rozruchu kotłów pyłowych spowodowała, że w wielu krajach rozwiniętych podjęto prace nad „plazmowym” rozruchem kotłów pyłowych. Mimo prostoty koncepcji „plazmowego” rozruchu kotłów, istnieje wiele przeszkód w jej realizacji, przede wszystkim natury technologicznej.

## 2. Plazma w procesach spalania

Zastosowanie wyładowań elektrycznych jest szeroko rozpowszechnione w technice spalania. Wyładowania elektryczne to wygodne i pewne źródło zapłonu w takich urządzeniach jak: silniki spalinowe, silniki odrzutowe, turbiny gazowe, palniki gazowe i olejowe [1, 2, 3, 4, 5]. Ze względu na niesiony strumień energii oraz zdolność do zmiany właściwości i składu mieszanki palnej, wyładowania elektryczne znalazły również zastosowanie w zmniejszeniu emisji zanieczyszczeń z procesów spalania [6, 7].

Zachodzące w obszarze wyładowania elektrycznego procesy, takie jak: dysocjacja termiczna, jonizacja, chemijonizacja, rozkład termiczny substancji, oddziaływania międzycząsteczkowe, intensywna wymiana ciepła i inne, mogą odgrywać pewną rolę podczas zapłonu i spalania [8, 9]. W zależności od rodzaju wyładowania (ciemne, jarzeniowe, koronowe, iskrowe, łukowe) i rodzaju mieszaniny palnej, przebiegać mogą wszystkie lub tylko niektóre z wymienionych procesów i zjawisk [10]. Każdy z wymienionych typów wyładowań elektrycznych może wpływać na procesy spalania, chociaż z różną intensywnością.

### 2.1. Właściwości plazmy

Plazma jest to stan gazu, w którym znajdują się skoncentrowane elektrony swobodne i jony, przy czym ich liczba jest taka sama [11]. Za stan plazmowy przyjęto uważać taką mieszaninę neutralnych cząstek gazowych z cząstkami naładowanymi elektrycznie, która ma dostatecznie dużą przewodność elektryczną. Stan taki jest osiągany już przy niewielkiej koncentracji ładunków elektrycznych, gdyż wystarcza jedna para elektron – jon na 100 000 cząstek neutralnych, aby mieszanina taka stała się niezłym przewodnikiem, co pozwala zaliczyć ją do plazmy [12]. Według energetycznego kryterium klasyfikacji plazma jest uważana za czwarty stan materii, po stałym, ciekłym i gazowym.

Najbardziej rozpowszechnioną metodą otrzymywania plazmy jest przepuszczenie gazu przez obszar wyładowania łukowego. Inne sposoby otrzymywania plazmy to: wyładowania wysokiej częstotliwości, mikrofały, fale uderzeniowe czy wiązka laserowa [13]. Umownie plazmę dzieli się na:

- niskotemperaturową (charakteryzuje ją niewielki stopień koncentracji ładunków elektrycznych, a średnie energie kinetyczne jej najbliższych cząstek, czyli elektronów, nie przekraczają 20 eV),



- wysokotemperaturową (odznaczającą się wysokim stopniem jonizacji i energiami kinetycznymi elektronów większymi od 20 eV).

W skali energetycznej cząstce o danej energii można przypisać temperaturę zgodnie ze wzorem [14]:

$$T = \frac{2}{3} \cdot \frac{E}{k} \quad (2.1)$$

Wynika stąd, że górną granicą temperatury plazmy niskotemperaturowej jest wartość z przedziału  $(20 \div 100) \cdot 10^3$  K [15]. Plazma charakteryzuje się dużym współczynnikiem przenoszenia ciepła oraz dużą koncentracją energii (do  $40 \cdot 10^3$  W/cm<sup>3</sup>) [9], przy czym 15 ÷ 57% energii przypada na zdysocjowane cząstki [16]. Inne właściwości plazmy to przewodność elektryczna w zakresie  $10 \div 100 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  oraz zdolność generacji i wzmacniania drgań elektromagnetycznych oraz mechanicznych [10]. Zaletą plazmy jest łatwość regulacji jej parametrów, takich jak: temperatura, strumień ciepła, prędkość, skład chemiczny i ciśnienie gazu roboczego [9].

W technice spalania stosuje się przede wszystkim plazmę o temperaturze z zakresu  $2000 \div 20\,000$  K, w której częściowo zjonizowany gaz składa się z cząstek elektrycznie neutralnych oraz elektronów i jonów w stężeniu  $10^{10} \div 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  [9].

## 2.2. Generatory plazmy

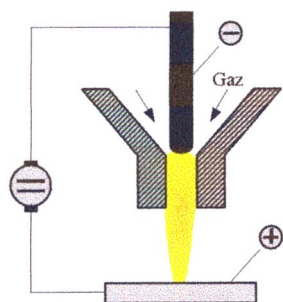
Generatorem plazmy jest urządzenie zwane powszechnie plazmotronem, w którym pomiędzy katodą i anodą powstaje łuk elektryczny. Przepływający przez obszar wyładowania gaz wytwarza strumień plazmy, który wypływa z dużą prędkością na zewnątrz urządzenia [9]. Plazmotrony powinny charakteryzować się trwałością i stabilnym działaniem oraz zapewnić dużą sprawność energetyczną [17].

### 2.2.1. Typy plazmotronów

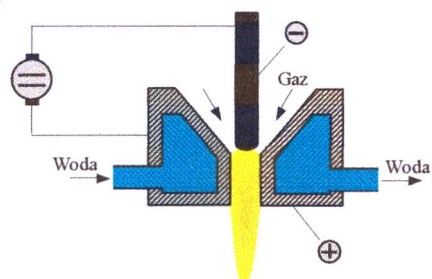
Ze względu na duże zastosowanie plazmy w różnych działach techniki trudno jest jednoznacznie sklasyfikować plazmotrony. Na rysunkach 2.1 ÷ 2.5 podano przykłady podziału plazmotronów na typy ze względu na [9]:

a) rodzaj łuku:

a)



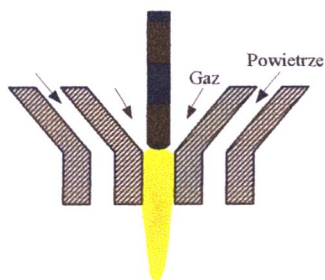
b)



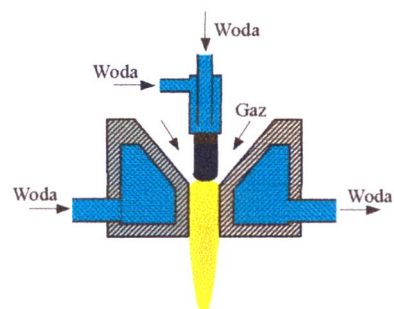
Rys. 2.1. Podział plazmotronów ze względu na rodzaj łuku:  
z łukiem zewnętrznym (a), z łukiem wewnętrznym (b)

b) system chłodzenia:

a)



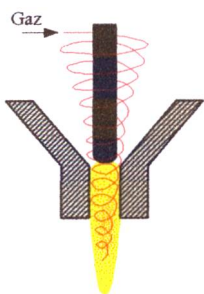
b)



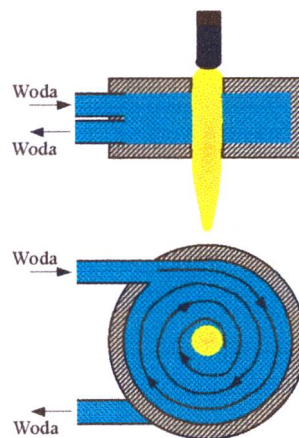
Rys. 2.2. Podział plazmotronów ze względu na system chłodzenia:  
gazowy (a), wodny (b)

c) stabilizację łuku:

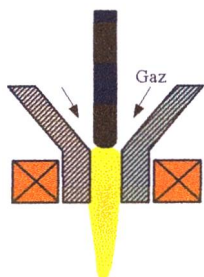
a)



b)



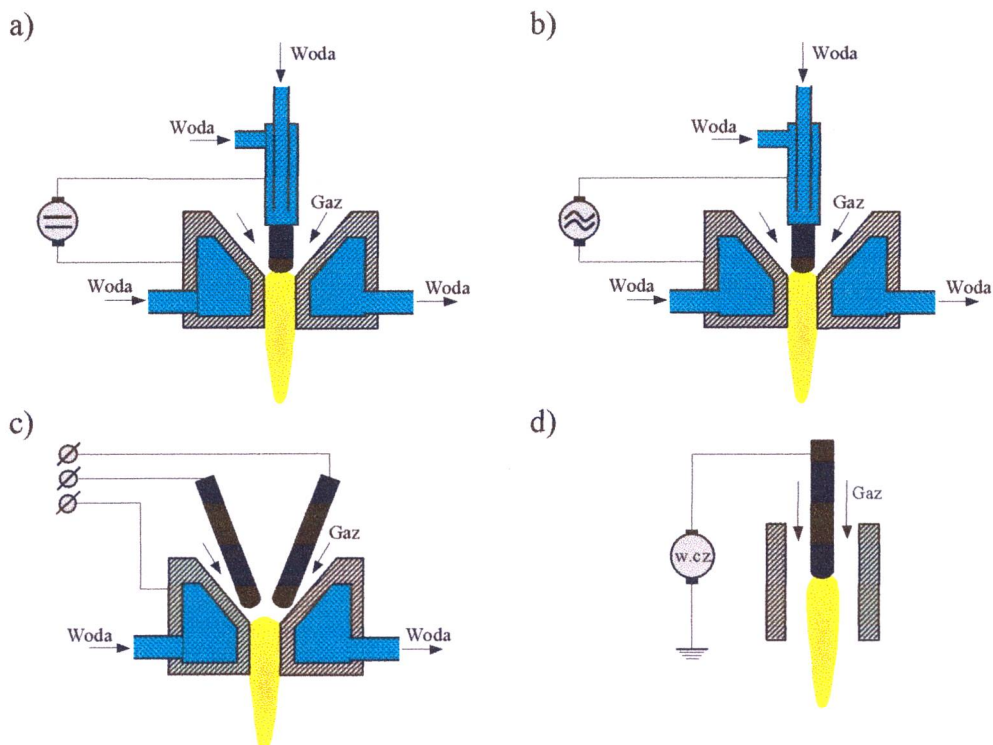
c)



Rys. 2.3. Podział plazmotronów ze względu na rodzaj stabilizacji łuku:  
gazowa (a), wodna (b), magnetyczna (c)

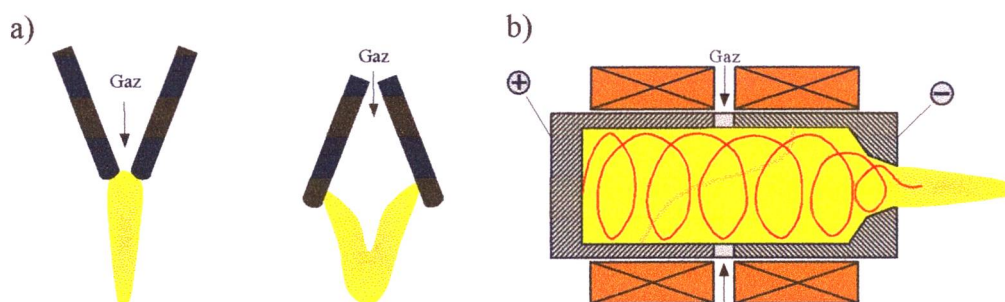
d) rodzaj gazu roboczego: obojętny, redukujący, utleniający,

e) rodzaj prądu zasilającego:



Rys. 2.4. Podział plazmotronów ze względu na rodzaj prądu zasilającego: stały (a), zmienny jednofazowy (b), zmienny trójfazowy (c), wielkiej częstotliwości (d)

f) specjalne zastosowania:



Rys. 2.5. Plazmotrony specjalne: elektrodowe (a), wnekowe (b), bezelektrodowe

## 2.2.2. Elektrody plazmotronów

Elektrody są najważniejszymi elementami plazmotronu, ponieważ między nimi rozwija się łuk. Zwykle anoda przejmuje większy strumień ciepła niż katoda i dlatego jest ona intensywniej chłodzona. Z zasady stosuje się chłodzenie wodne anody, a w przypadku plazmotronów dużej mocy niezbędne jest także chłodzenie katody wodą. Przyjmuje się, że współczynnik przejmowania ciepła od elektrod plazmotronu powinien wynosić co najmniej  $5 \cdot 10^3 \text{ W/cm}^2$  [18].

Występujące maksymalne różnice temperatur w elektrodach określa z jednej strony dopuszczalna temperatura czynnika chłodzącego (w przypadku wody  $20 \div 40$  °C), a z drugiej temperatura topnienia materiału elektrody. Zachodzi zatem konieczność optymalizacji grubości ścianek elektrod (zbyt duża grubość powoduje wzrost oporu cieplnego, zbyt mała grubość skraca czas pracy plazmotronu w wyniku erozji elektrod). Stosując miedź na elektrody i wodę na chłodzenie, za optymalne uważa się grubości ścianek w przedziale  $3 \div 5$  mm. Przyjmuje się, że 50% mocy elektrycznej plazmotronu odprowadzane jest z wodą chłodzącą, której wzrost temperatury nie powinien przekroczyć  $10 \div 20$  °C [15].

Katody plazmotronów wykonuje się z miedzi, grafitu, wolframu, wolframu torowanego ( $W + 2\%ThO_2$ ), tantalu, cyrkonu i niobu [19]. Ze względu na dobre przewodnictwo cieplne anoda jest wykonana z reguły z miedzi [20]. Inne materiały stosowane na anodę to: tytan, nikiel, molibden i wolfram [19].

Z powodu pracy elektrod w wysokich temperaturach i przy dużych obciążeniach cieplnych ich czas pracy jest ograniczony. Erozja elektrod jest wynikiem procesów fizycznych zachodzących w ich obrębie i objawia się cieplnymi kraterami oraz naruszeniem struktury krystalicznej materiału. Szybkość erozji zależy między innymi od: natężenia prądu, rodzaju gazu roboczego i temperatury plazmy. Na przykład, erozja powierzchniowa miedzi chłodzonej wodą wynosi około  $10^{-9}$  kg/(A·s) [21].

Rodzaj materiału użytego na elektrody zależy głównie od temperatury i parametrów pracy plazmotronu oraz rodzaju czynnika nośnego plazmy. Niektóre właściwości materiałów stosowanych na elektrody przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1

Właściwości podstawowych materiałów elektrodowych [15]

| Materiał               | Praca wyjścia                | Konduktywność                    | Przewodność cieplna właściwa | Temperatura topnienia | Wymagane medium gazowe         |
|------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| -                      | eV                           | m/( $\Omega \cdot mm^2$ )        | W/(m·K)                      | K                     | -                              |
| <i>W</i>               | 4,53                         | 18,20                            | 130                          | 3663                  | gazy szlachetne, $H_2$ , $N_2$ |
| <i>W/Th</i>            | $2,84 \div 3,2$              | 18,20                            | 130                          | 3663                  | gazy szlachetne, $H_2$ , $N_2$ |
| <i>Cu (CuO)</i>        | 4,48                         | 56,20                            | 394                          | 1356                  | dowolne                        |
| <i>Ag</i>              | 4,70                         | 60,50                            | 408                          | 1234                  | dowolne                        |
| <i>Cu/Ag</i>           | w zależności od składu stopu |                                  |                              |                       | dowolne                        |
| Grafit                 | 4,36                         | $0,20 \div 0,05$                 | $100 \div 200$               | 4100                  | dowolne                        |
| <i>ZrO<sub>2</sub></i> | 4,20                         | w zależności od obróbki wstępnej |                              |                       | $CO$ , $CO_2$                  |

### 2.2.3. Gazy robocze plazmotronów

Rodzaj gazu roboczego jest ważny dla działania plazmotronu, ponieważ struga gazu, oprócz stabilizacji wyładowania łukowego i ochrony dyszy przed zniszczeniem, spełnia funkcję nośnika energii cieplnej. O jego wyborze decydują następujące czynniki: temperatura plazmy, moc plazmotronu, aktywność chemiczna i koszt gazu [17].

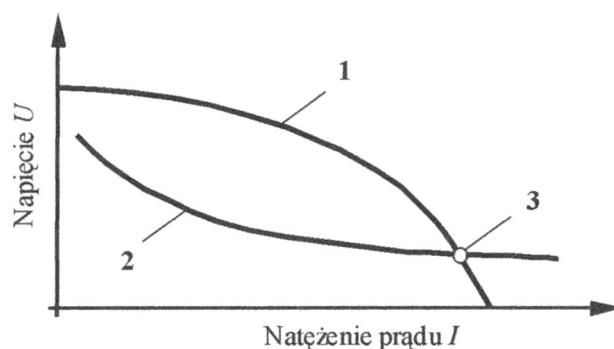
Najczęściej stosowanymi gazami roboczymi w plazmotronach są argon i azot, inne gazy robocze to: wodór, hel, para wodna,  $CO_2$ ,  $CO$ , powietrze i tlen. Wybór gazu roboczego wpływa również na temperaturę plazmy oraz straty ciepłe i erozję elektrod. Ze względu na pojemność cieplną, gazy dwuatomowe mogą przenosić znacznie więcej energii cieplnej niż gazy jednoatomowe, ale trudniej ulegają jonizacji. Plazma gazów dwuatomowych odznacza się mniejszą koncentracją elektronów i przy tej samej wartości mocy elektrycznej dostarczonej do plazmotronu łukowego ma niższą temperaturę [22]. Do podtrzymywania łuku elektrycznego w gazie dwuatomowym wymagane jest wyższe napięcie niż w gazie jednoatomowym (na przykład:  $H_2$  – 95 V,  $O_2$  – 45 V,  $Ar$  – 20 V) [11].

Tlen jako gaz roboczy ma wiele zalet, ale ze względu na utlenianie materiału elektrod w wysokiej temperaturze bardzo skraca ich czas pracy. W przypadku stosowania gazów obojętnych czas pracy elektrod dochodzi do 1000 godzin, a dla gazów z udziałem tlenu ograniczony jest do 5 ÷ 6 godzin. Sposobem wydłużania czasu działania plazmotronu z takimi czynnikami roboczymi jak: powietrze, tlen i inne gazy agresywne, jest ochrona katody gazem inertnym [20].

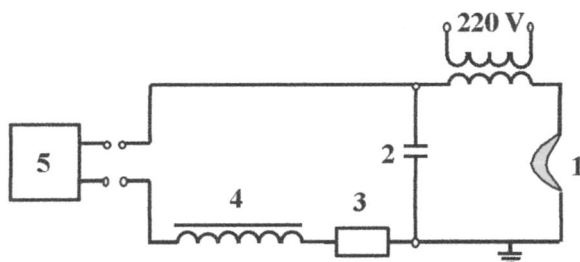
### 2.2.4. Zasilanie elektryczne plazmotronów

Największą trudnością zasilania elektrycznego plazmotronów jest potrzeba napięcia zapłonu wyrażonego w kV oraz napięcia podtrzymującego łuk wyrażonego tylko w V. Napięcie zapłonu łuku zależy przede wszystkim od odległości między elektrodami oraz rodzaju i ciśnienia gazu roboczego. W zależności od typu plazmotronu stosuje się dwa rodzaje zasilaczy:

- źródła zasilania elektrycznego o bardzo „miękkiej” charakterystyce prądowo – napięciowej (Rys. 2.6) [23],
- układ zapłonowy dający wyładowanie 10 ÷ 20 kV i zasilacz dużej mocy o napięciu podtrzymania łuku (Rys. 2.7).



Rys. 2.6. Charakterystyka prądowo – napięciowa pracy plazmotronu [11]:  
1 – charakterystyka źródła zasilania, 2 – charakterystyka łuku, 3 – punkt pracy łuku



Rys. 2.7. Przykładowy schemat elektryczny układu zapłonowego plazmotronu [24]:  
1 – plazmotron, 2 – kondensator, 3 – rezystor, 4 – dławik, 5 – zasilacz, 6 – iskrownik

## 2.3. Zastosowanie plazmy w technice spalania

Wyładowania elektryczne mają szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach techniki, w których występuje spalanie. Inicjują procesy spalania, wpływają na ich rozwój oraz mają istotne znaczenie dla ekonomiki, ekologii i bezpieczeństwa spalania.

### 2.3.1. Plazmowe układy zapłonowe

Zapłon mieszanki palnej można wywołać wyładowaniem elektrycznym, a najmniejsza energia wyładowania elektrycznego niezbędna do zapłonu nazywa się minimalną energią zapłonu  $E_{\min}$  [25]. Minimalna energia zapłonu zależy od wielu czynników, wśród których ważny jest rodzaj substancji palnej (Tab. 2.2).

Tabela 2.2  
Minimalna energia zapłonu dla różnych paliw

| Paliwo               | $E_{\min}$ , mJ |
|----------------------|-----------------|
| Metan [26]           | 0,47            |
| Węgiel brunatny [27] | 40              |
| Węgiel kamienny [28] | 310             |



Z powodu powszechnego zastosowania zapłonu elektrycznego prowadzi się wiele badań naukowych mających na celu zrozumienie jego mechanizmu i poprawę działania urządzeń zapłonowych [2]. Jednym z takich rozwiązań jest zapłon plazmowy, polegający na wytworzeniu, a następnie wprowadzeniu plazmy do przestrzeni spalania mieszanki palnej [29]. Do najważniejszych urządzeń technicznych, w których zapłon plazmowy może znaleźć zastosowanie, można zaliczyć: tłokowe silniki spalinowe, silniki odrzutowe, turbiny gazowe i palniki.

Działanie urządzenia zapłonowego w tłokowych silnikach spalinowych ma duże znaczenie dla rozruchu silnika oraz emisji zanieczyszczeń [1]. Tendencja do spalania coraz uboższych mieszanek palnych ( $\lambda \gg 1$ ) w silnikach spalinowych powoduje, że poszukuje się sposobu zwiększenia efektywności zapłonu. Doświadczenia z plazmowym zapłonem w tłokowych silnikach spalinowych wykazały możliwość poprawy dynamiki spalania oraz lepszą skuteczność zapłonu (poszerzenie zakresu pracy) ubogich mieszanek [1].

W turbinach gazowych pewny zapłon należy do najważniejszych wymagań bezpiecznego i sprawnego działania tego silnika [4]. Na skuteczność zapłonu wpływa wiele czynników: właściwości i rozpylenie paliwa ciekłego, skład mieszanki palnej, prędkość przepływu i turbulencja, wilgotność powietrza i ciśnienie. *Oppenheim* i *Weinberg* [29] ze współpracownikami wykazali skuteczność zapłonu plazmowego mieszanek palnych w przepływie w warunkach zbliżonych do pracy turbin gazowych.

Bada się także możliwość zastosowania zapłonu plazmowego w silnikach odrzutowych [3]. Ze względu na duże prędkości przepływu mieszanki palnej i intensywną turbulencję warunki zapłonu są utrudnione. Wykazano znaczną skuteczność zapłonu plazmowego i w tym przypadku.

Prowadzone są także prace badawcze nad zastosowaniem plazmowego zapłonu w palnikach olejowych. Rozwiązanie takie, wykorzystujące wysokoczęstotliwościową plazmę, zostało zgłoszone w *Urzędzie Patentowym* [30]. Dalsze prace nad tym rozwiązaniem będą prowadzone przez autora pracy w ramach grantu *KBN* [31].

Chemiczne aspekty oddziaływania plazmy termicznej na strumień wodoru w przepływie naddźwiękowym badań *Takita* [32] analizując ten proces numerycznie w *2D*. Rozpatrywano przede wszystkim, jaki wpływ na zapłon wodoru ma rodzaj użytego gazu plazmotwórczego (rozpatrywano tlen, azot i argon). Kinetykę chemiczną spalania symulowano 45 reakcjami elementarnymi. Podstawowy wynik tych symulacji numerycznych to praktycznie brak wpływu rodzaju gazu plazmotwórczego na proces zapłonu. Oznacza to, że występujące w plazmie rodniki mają ograniczony wpływ na

efektywność zapłonu plazmą termiczną oraz, że dominującym czynnikiem jest wysoka temperatura plazmy.

Wielokrotnie wykazano podczas badań poświęconych problematyce wybuchowości pyłów możliwość zapłonu mieszanki pyłowo – powietrznej wyładowaniem elektrycznym [33, 34, 35]. Pył węglowy wymaga jednak znacznie większego nakładu energii do zapłonu niż paliwa gazowe lub ciekłe (Tab. 2.2). Z tego powodu plazma, jako wysokoenergetyczne wyładowanie elektryczne, nadaje się na źródło zapłonu i podtrzymania spalania w palnikach pyłowych [36]. Skuteczność zapłonu plazmowego stanowi podstawę do rozwoju plazmowych systemów rozruchowych mających wyeliminować mazutowe palniki rozpałkowe w energetyce zawodowej. Warunkiem powodzenia jest posiadanie źródeł plazmy o odpowiedniej mocy, działających niezawodnie w warunkach kotłowych i dopasowanych do właściwości paliwa i wymagań danego paleniska.

### **2.3.2. Zastosowanie plazmy do zmniejszenia emisji zanieczyszczeń**

Inne zastosowania technologii plazmowej w technikach spalania to: zmniejszenie emisji zanieczyszczeń, oczyszczanie spalin, incineracja niebezpiecznych odpadów i modyfikacja paliw.

Dzięki stabilizującemu działaniu pola elektrycznego udaje się spalać ubogie mieszanki gazowe, dla których płomień ma znacznie niższą temperaturę, niż płomień o bogatym składzie [37]. Ze względu na silną temperaturową zależność szybkości powstawania termicznych  $NO_x$  zmniejszenie temperatury płomienia powoduje znaczne zmniejszenie emisji tych  $NO_x$ . Efekt ograniczenia emisji  $NO_x$  dzięki tym elektrycznym oddziaływaniom obserwowano zarówno dla laminarnych, jak i turbulentnych płomieni gazowych [6].

Gazy odlotowe z wielu przemysłowych procesów chemicznych, jak: wytwarzanie tworzyw sztucznych, produkcja papieru, farb i innych, zawierają różne lotne związki organiczne (*VOCs*) [38]. W ich skład zaliczyć można: węglowodory (toluen, ksylen, etylobenzen), estry (octan etylu, octan butylu), alkohole (butylowy, etylowy). Lotne zanieczyszczenia organiczne wywierają negatywny wpływ na środowisko naturalne, a ponadto w pewnym stężeniu stwarzają zagrożenie wybuchowe. Dzięki wyładowaniom elektrycznym (koronowym lub łukowym) w obecności powietrza następuje ich konwersja do substancji o znacznie mniejszej szkodliwości [39]. Na przykład, w powietrzu zanieczyszczonym takimi substancjami organicznymi, jak: heptan, toluen i inne węglowodory, wyładowanie koronowe powoduje ich utlenienie z 90% skutecznością [40].



Możliwość uzyskiwania wysokich i bardzo wysokich temperatur w strumieniu plazmowym stwarza nową jakość procesu destrukcji odpadów w porównaniu do tradycyjnego spalania [7], ponieważ w temperaturze rzędu 10000 K mogą przebiegać takie reakcje chemiczne, jakie nie zachodzą w niższych temperaturach. Dzięki wysokiej temperaturze i dużej gęstości energii w plazmie, szybkość procesu destrukcji jest wysoka, co decyduje o dużej wydajności incynracji odpadów [41]. Istotą termochemicznej neutralizacji i likwidacji aktywnych substancji chemicznych jest wykorzystanie strefy plazmy do atomizacji, utleniania i przekształcenia produktów procesu w związki mało aktywne. Doprowadzenie do reaktora czynnika utleniającego zapewnia efektywne utlenianie odpadów w strefie plazmy. Istnieje możliwość uzyskania końcowych produktów incynracji odpadów w postaci niewymywalnego szkła. W tym celu do reaktora łukowego wprowadza się dodatkowo stabilizujące dodatki, które ulegają przetopieniu i wiążą pozostałości po incynracji. Odpady wtórne powstają w minimalnych ilościach, zwykle poniżej 1% masy wsadu [7]. Przykłady zastosowania plazmy do procesu utylizacji odpadów niebezpiecznych w reaktorach plazmowych to: odpady szpitalne i komunalne [7], odpady chloroorganiczne [42], opony [43], azbest i lotne popioły [44] oraz odpady radioaktywne [45].

### **2.3.3. Modyfikacja paliw za pomocą wyładowań elektrycznych**

Istnieją możliwości zastosowania wyładowań elektrycznych do modyfikacji paliw kopalnych, dzięki którym można zmieniać skład palnych mieszanek, a nawet wytwarzać nowe paliwa lub substraty dla technologii chemicznej. Węgiel i ropa naftowa, obok roli podstawowych surowców energetycznych, znajdują zastosowanie jako wyjściowe substraty chemiczne w procesach syntezy organicznej. Z paliw kopalnych otrzymuje się cenne węglowodory gazowe takie jak: acetylen, etylen czy metan.

Wywołując wyładowanie koronowe w dyfuzyjnym płomieniu metanowym powoduje się, że metan przed spalaniem ulegnie głębokim przemianom. Przede wszystkim pojawi się sadza, a ponadto metan w dużym stopniu (10 ÷ 40%) ulegnie rozkładowi do acetyleny i wodoru [46]. Podobne efekty obserwowano prowadząc badania w pirolitycznym reaktorze plazmowym z użyciem ciekłych węglowodorów [47, 48].

Wywołując wyładowanie łukowe w strumieniu pyłu węglowego stwarza się możliwość uzyskania palnych składników gazowych, ponieważ szybkie ogrzanie cząstek węgla do temperatury powyżej 1500 K powoduje ich gwałtowny rozkład termiczny z

intensywnym wydzieleniem części lotnych [49]. Przeprowadzono badania rozkładu pyłu węglowego o zawartości części lotnych 36% w strumieniowym reaktorze plazmochemicznym. Stwierdzono jego 40% rozkład do acetylenu dla plazmy wodorowej i 20% dla plazmy argonowej [50]. W wyniku przepływu mieszanki pyłu węglowego i dwutlenku węgla przez obszar wyładowania łukowego w reaktorze plazmowym uzyskano redukcję  $CO_2$  do  $CO$  ze sprawnością  $80 \div 87\%$  [51].

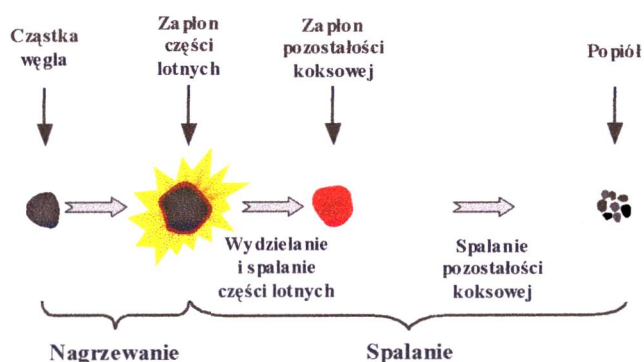
### 3. Stabilizacja płomieni pyłowych

Spalanie pyłu węglowego jest trudniejsze i bardziej skomplikowane od spalania paliw gazowych i ciekłych. Przede wszystkim w odróżnieniu od spalania paliw gazowych i ciekłych płomień pyłowy nie może istnieć w zimnym otoczeniu, dla jego stabilizacji potrzebna jest recyrkulacja gorących spalin. Ponadto zapłon mieszanki pyłowo – powietrznej wymaga znacznie większej energii (Tab. 2.2). Zagadnienie stabilizacji płomieni ma szczególne znaczenie przy projektowaniu urządzeń, w których spalanie ma charakter turbulentny, ponieważ zwiększa się liczba czynników wpływających na proces spalania (zapłon miejscowy, propagacja płomienia, zjawisko gaśnięcia i powtórnego zapłonu, stopień zawirowania, strumienie przepływu oraz prędkości wypływu powietrza i paliwa itd.) [52, 53].

W energetyce węglowej istnieje zainteresowanie zagadnieniem stabilności działania palników pyłowych, wynikające z: konieczności prowadzenia bloków energetycznych z małym obciążeniem (minimum techniczne poniżej 50%), potrzeby stabilizacji pracy niskoemisyjnych palników pyłowych, prób opracowania pyłowych palników podtrzymujących małej mocy, możliwości rozruchu kotłów pyłowych bez palników mazutowych oraz wpływu stabilności płomienia na jakość spalania i emisję zanieczyszczeń.

#### 3.1. Zapłon mieszaniny pyłowo – powietrznej

Spalanie mieszanki palnej jest poprzedzone fazą zapłonu [54]. Mechanizm zapłonu mieszanki pyłowo – powietrznej jest skomplikowany, ponieważ zapłonowi ulegają pojedyncze cząstki pyłu (Rys. 3.1), które spalają się wieloetapowo [52]. Na czas indukcji zapłonu wpływa sposób przekazywania ciepła od płomienia do cząstek pyłu, który zależy od temperatury płomienia, konwekcji swobodnej, stężenia pyłu i charakteru spalania (laminarny, turbulentny) [53, 55].



Rys. 3.1. Etapy spalania cząstki węgla w płomieniu [56]

Cząstki węglowe, aby zapalić się muszą uzyskać odpowiednią temperaturę umożliwiającą zapłon wydzielających się części lotnych, których koncentracja jest maksymalna na powierzchni cząstki i spada wraz ze wzrostem odległości od jej powierzchni [57]. Zapłon części lotnych jest możliwy tylko wtedy, kiedy temperatura i ich koncentracja są wyższe niż wymagane dla zapłonu mieszanki gazowej. Obserwacje pokazały, że wydzielanie się części lotnych i ich zapłon zachodzi zawsze od strony cząstki wystawionej na działanie ciepła od innych cząstek lub od płomienia [3]. W warunkach bardzo intensywnego dopływu ciepła do cząstki węgla możliwy jest jej zapłon przed rozpoczęciem procesu odgazowania. W takim przypadku następuje prawie równoczesny zapłon pozostałości koksowej i części lotnych zawartych w węglu, które palą się bezpośrednio na powierzchni [58].

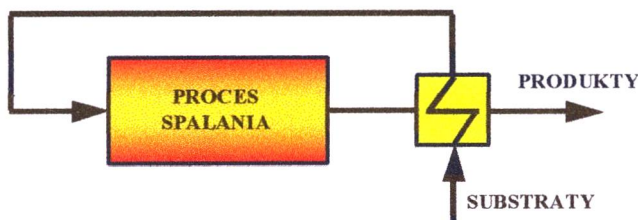
### 3.2. Gaśnięcie płomieni

Stabilność pracy palników łączy się ze zjawiskiem gaśnięcia płomieni. Problem ten jest złożony, ponieważ istnieje wiele czynników, które mogą spowodować gaśnięcie płomienia: skład mieszanki poza granicami palności, straty ciepła od płomienia (za mała moc palnika, zbyt zimne otoczenie), za mała strefa recyrkulacji, za duża prędkość wypływu lub zbyt duża turbulencja.

Próba matematycznej interpretacji tego zjawiska musi zawsze uwzględnić silnie nieliniowy charakter zależności szybkości reakcji spalania  $\omega$  od temperatury, wyrażony wzorem *Arrheniusa*:

$$\omega(c, T) = c^n k_o e^{-E/RT} \quad (3.1)$$

Najważniejszym efektem procesu spalania jest intensywne wydzielanie ciepła powodujące wzrost temperatury produktów spalania. Te dwa efekty: eksponencjalna zależność szybkości spalania od temperatury oraz intensywne wydzielanie ciepła, powodują sprzężenie zwrotne przyczyniające się do stabilności procesu spalania (Rys. 3.2). Z matematycznego punktu widzenia sprzężenie zwrotne w procesach spalania jest źródłem wielokrotności stanów stacjonarnych oraz występowania oscylacji.

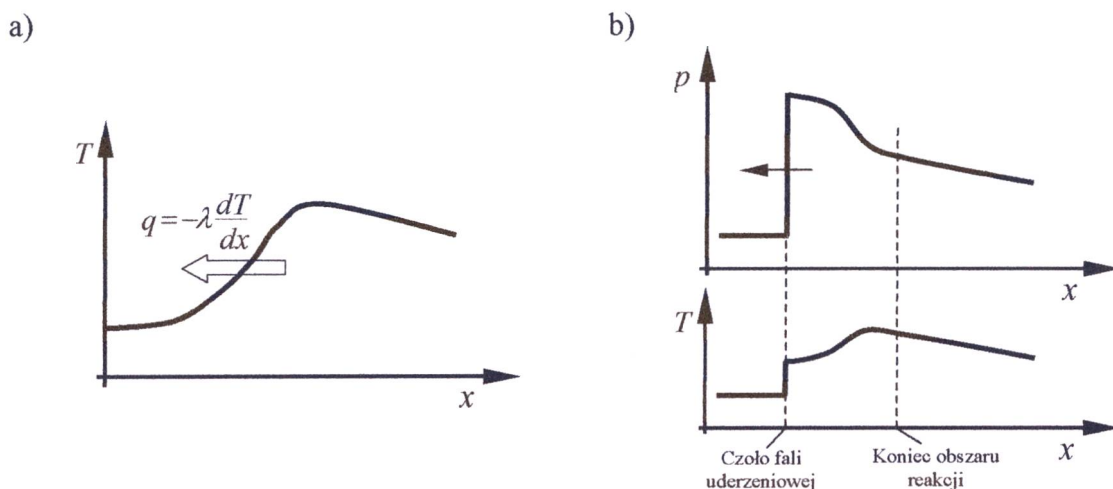


Rys. 3.2. Sprzężenie zwrotne zachodzące w procesach spalania



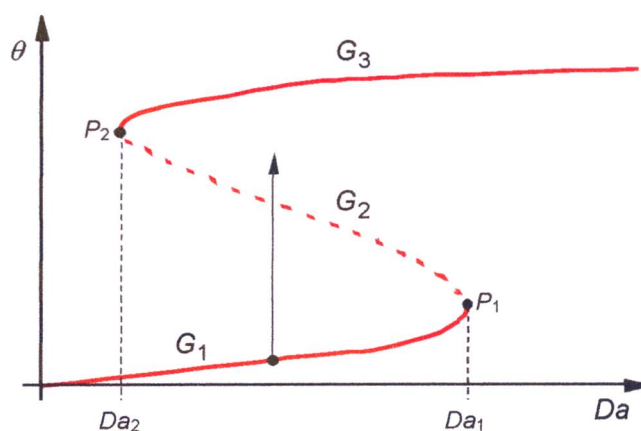
Ciepne sprzężenie zwrotne może być realizowane różnymi sposobami, na przykład mechanizm propagacji płomienia może opierać się na (Rys. 3.3):

- przewodzeniu ciepła od płomienia do świeżej mieszanki (deflagacja),
- sprężaniu świeżej mieszanki falą uderzeniową (detonacja).



Rys. 3.3. Mechanizm propagacji płomienia przez [54]:  
przewodzenie ciepła (a), sprężanie świeżej mieszanki falą uderzeniową (b)

W najprostszym przypadku nieliniowy charakter zależności szybkości procesu spalania od temperatury i występującego sprzężenia zwrotnego przyjmuje formę krzywej  $S$  (Rys. 3.4).



Rys. 3.4. Schematyczny przebieg krzywej  $S$  obrazującej nieliniowy charakter spalania

Zazwyczaj na osi odciętych wiodącym parametrem układu jest liczba Damkoehlera, a na osi rzędnych temperatura lub szybkość reakcji. Geometria krzywej  $S$  pozwala poglądowo wytłumaczyć zachowanie się wielu układów spalania. Dolna gałąź ( $G_1$ ) odpowiada stanowi „bez spalania”, górna gałąź ( $G_3$ ) odpowiada stanowi „ze spalaniem”, a gałąź pośrednia ( $G_2$ ) jest niestabilna, czyli w rzeczywistości nie istnieje. Punkty zwrotne ( $P_1$  i  $P_2$ ) odpowiadają odpowiednio warunkom granicznym zapłonu i gaśnięcia.

Przejście od gałęzi dolnej do gałęzi górnej jest możliwe po przekroczeniu wartości  $Da_1$  (samozapłon), lub skokowo (zapłon wymuszony). Gaśnięcie to zmniejszenie  $Da < Da_2$ , lub wymuszone czynnikiem zewnętrznym (wychłodzenie płomienia, duża prędkość wypływu mieszanki palnej).

Zjawisko gaśnięcia płomieni jest bardziej skomplikowane niż zjawisko zapłonu, ponieważ występują w nim skomplikowane sprzężenia hydromechaniczne, a ponadto przekazywanie ciepła jest bardzo złożone. Zwłaszcza w przypadku płomieni turbulentnych, które dominują w zastosowaniach przemysłowych, proponowane modele gaśnięcia znacznie odbiegają od „arrheniusowskiej” kinetyki i bardziej uwzględniają aspekty hydromechaniczne, stając się heurystyczne w swej naturze [59]. Warto jeszcze uzupełnić, że w ostatnich latach liczba publikacji poświęcona problematyce gaśnięcia znacznie wzrosła, jest to wynikiem potrzeby określenia zakresu stabilności palników oraz komór spalania już w stadium ich projektowania. Największe znaczenie praktyczne mają metody określenia zakresu stabilności palników z wykorzystaniem metod modelowania numerycznego [60].

### 3.3. Charakter płomieni pyłowych

Prędkość propagacji turbulentnego płomienia pyłowego w ustalonych warunkach sięga 1 m/s [33], natomiast prędkość wypływu mieszanki pyłowej wynosi około 20 m/s, a powietrza wtórnego w palnikach pyłowych 20 ÷ 40 m/s [61]. Zatem dla stabilnego działania palników pyłowych niezbędny jest dodatkowy czynnik, który zapobiegnie zerwaniu płomienia pyłowego.

Wypływająca z dyszy pyłowego palnika mieszanka pyłowo – gazowa tworzy w komorze spalania turbulentną strugę, która rozprzestrzenia się w środowisku gorących spalin. Dzięki intensywnemu turbulentnemu mieszaniu następuje iniekcja gorących spalin do warstwy granicznej strugi, a w kontakcie z gorącymi spalinami cząstki węglowe nagrzewają się i ulegają zapłonowi.

Dla zakresu stabilności płomieni pyłowych ważne znaczenia ma zarówno udział części lotnych (w przypadku węgla energetycznych  $V^a > 28\%$  [62]), jak i szybkość ich wydzielania. Z tego powodu do palenisk pyłowych przeznacza się węgle brunatne i młode węgle kamienne charakteryzujące się niską temperaturą rozkładu termicznego. Spalanie części lotnych odbywa się w niewielkim oddaleniu od wylotu palnika, z udziałem

powietrza pierwotnego. Organizacja spalania u wylotu palnika pyłowego ma duże znaczenie dla stabilności płomienia i emisji  $NO_x$  [63].

Obserwacja pracy paleniska kotłowego wskazuje na dwa graniczne warunki działania palników pyłowych. Utrata stabilności płomienia pyłowego poprzedzona jest wystąpieniem pulsacji, następnie płomień odsuwa się od wylotu i urywa [64]. Druga niekorzystna sytuacja występuje, kiedy płomień lokuje się zbyt blisko wylotu palnika (tzw. „gorący palnik”). W przypadku palników dużej mocy, jak na przykład dla kotłowych palników pyłowych, których moc sięga  $40 \div 60$  MW, grozi to spalaniem palnika.

Najtrudniejsze warunki pracy palników pyłowych występują podczas rozruchu kotła i pracy bloku z zaniżoną wydajnością. W pierwszym przypadku brak zewnętrznej recyrkulacji gorących spalin powoduje, że płomień pyłowy nie może utrzymać się za palnikiem, dla jego podtrzymania stosuje się rozpałkowe palniki olejowe.

### **3.4. Sposoby stabilizacji płomieni pyłowych**

W celu rozszerzenia zakresu stabilności palników pyłowych w kotłach pyłowych stosuje się następujące środki:

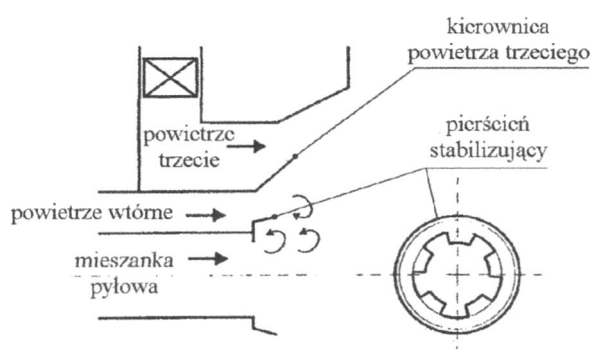
- zawirowanie powietrza wtórnego,
- podwyższenie temperatury powietrza wtórnego,
- recyrkulację spalin,
- stateczniki na wylocie palnika,
- płomień podtrzymujący (np. palnik mazutowy),
- pas zapłonowy w palenisku.

Zasadnicze znaczenie dla stabilności płomienia pyłowego ma recyrkulacja gorących spalin, które powodują zapłon świeżej mieszanki pyłowo – powietrznej. Z tego powodu ważna jest aerodynamika, zarówno w skali paleniska, jak i w skali pojedynczego palnika pyłowego. Odpowiednie ukierunkowanie płomieni w palenisku pyłowym powoduje, że podtrzymują się wzajemnie. W skali pojedynczego palnika ważna jest zarówno recyrkulacja zewnętrzna, jak i wywołana zawirowaniem lub statecznikiem recyrkulacja wewnętrzna.

W kotłach pyłowych stosuje się dwa typy palników pyłowych: strumieniowe (instalowane narożnie) i wirowe (instalowane naściennie). W palnikach strumieniowych stabilizację płomienia pyłowego zapewnia recyrkulacja zewnętrzna spalin, w palnikach wirowych o stabilności płomienia pyłowego decyduje wewnętrzna strefa recyrkulacji,



która powinna zapewniać występowanie w niej małych cząstek węgla [65]. W niskoemisyjnych palnikach pyłowych dodatkowo instaluje się w przewodzie pyłowym stabilizujące występy (np.: z węglików krzemu). Ta niewielka przeszkoda (Rys. 3.5) spowalnia przepływ, koncentruje pył węglowy i wytwarza niewielką strefę recyrkulacji, które razem „utrzymują” płomień blisko wylotu palnika [56]. Zależnie od trajektorii cząstek węglowych, ich czas przebywania w strefie recyrkulacji jest w zakresie  $10 \div 100$  ms, co wystarcza jedynie na podgrzanie, zapłon i spalenie części lotnych mniejszych cząstek [64].



Rys. 3.5. Stabilizacja bogatego płomienia pyłowego ceramicznym statecznikiem [56]

Stabilizacja spalania płomieniem pilotowym nie jest rozpowszechniona, ponieważ płomień pilotujący też może zgasnąć. Jednak podczas pracy kotła z niskim obciążeniem konieczne bywa doprowadzenie dodatkowego ciepła stabilizującego pracę głównych palników pyłowych. W energetyce węglowej w tym celu uruchamiane są palniki olejowe, które wspomagają proces spalania pyłu węglowego.

Jeżeli konstrukcyjne sposoby rozszerzenia zakresu stabilności palników pyłowych okazują się niewystarczające, trzeba zastosować dodatkowe środki, przede wszystkim przez zastosowanie źródła energii o większej koncentracji. Na przykład, znany jest sposób uzyskania efektu stabilizującego – redukującego w niskoemisyjnych palnikach pyłowych przez niewielki dodatek palnego gazu [66]. Inne sposoby poprawy stabilności płomienia pyłowego opierają się na wykorzystaniu energii elektrycznej:

- przez bezpośrednie elektryczne podgrzewanie mieszanki pyłowo – powietrznej elementami grzejnymi [67],
- przez zastosowanie wyładowań elektrycznych z generacją termicznej plazmy.

Zastosowanie plazmotronów do stabilizacji płomieni pyłowych należy zatem do tej kategorii technik stabilizacji płomieni. Generowana w plazmotronie plazma zmienia skład mieszanki pyłowo – powietrznej, czyniąc ją bardziej reaktywną [68].

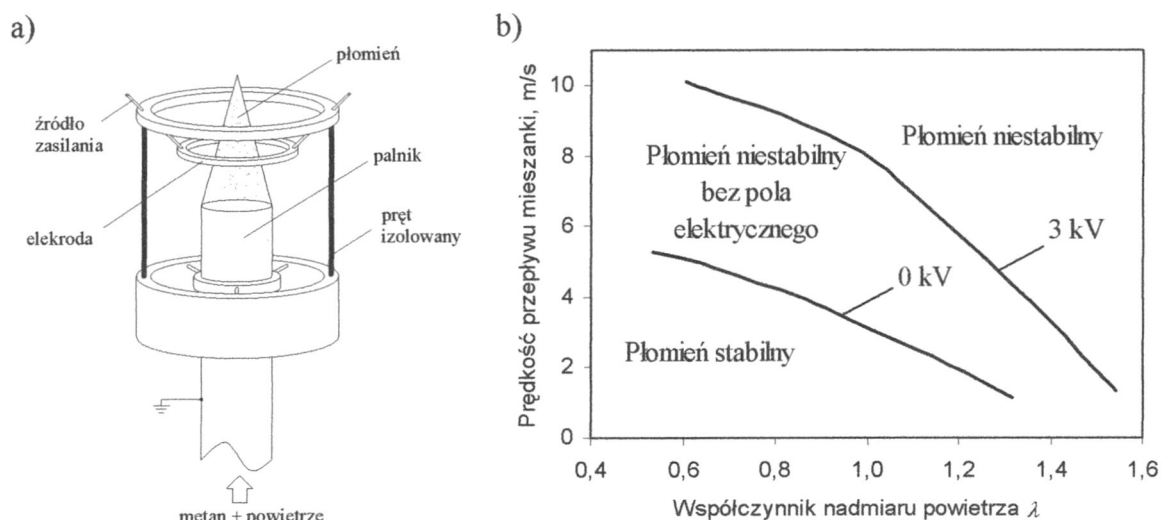
### 3.5. Stabilizacja płomieni wyładowaniami elektrycznymi

Stateczność płomienia jest istotna w wielu urządzeniach technicznych, zwłaszcza kiedy występują w nich duże prędkości przepływu, turbulencja, wilgotność oraz zmiany temperatury i ciśnienia. Konieczność ograniczenia emisji zanieczyszczeń z systemów spalania dodatkowo komplikuje zagadnienie stabilizacji płomieni [54].

Istnieje wiele sposobów poprawy stabilności płomieni [69]. Interesujące możliwości stwarza zastosowanie niektórych efektów elektrycznych, a do najbardziej obiecujących należą: pole elektryczne, wyładowanie koronowe i wyładowanie łukowe.

#### 3.5.1. Wpływ pola elektrycznego na stabilność płomieni gazowych

Istnieje możliwość poprawy stabilności gazowych płomieni przez przyłożenie pola elektrycznego wywołanego napięciem kilku tysięcy wolt w strefie spalania. *Calcote* ze współpracownikami [6] obserwowali efekt stabilizacji płomienia zarówno podczas spalania ubogich, jak i bogatych mieszanin. Na rysunku 3.6a pokazano usytuowanie elektrod względem płomienia gazowego, a uzyskany efekt stabilizacji płomienia metanowo – powietrznego pokazano na rysunku 3.6b na podstawie cytowanej pracy.



Rys. 3.6. Wpływ pola elektrycznego na zwiększenie zakresu stabilności płomienia gazowego: schemat układu elektrod (a), zależność dla mieszanki metan – powietrze (b) [6]

Pobór mocy elektrycznej podczas stabilizacji płomienia „ciemnym” wyładowaniem elektrycznym był niewielki, w eksperymencie, którego wyniki przedstawiono na rysunku 3.6b, wynosił 0,01% mocy cieplnej palnika [6]. Pomimo, że efekt stabilizacji płomienia gazowego przy pomocy pola elektrycznego znany jest od pół wieku, brak przekonującego wyjaśnienia mechanizmu stabilizacji. *Calcote* i *Berman* [6] sugerują, że stabilizację

płomienia powoduje pole elektryczne generujące „wiatr jonowy”, który opóźnia oderwanie płomienia od wylotu palnika powodowane wzrostem prędkości wypływu.

### 3.5.2. Stabilizacja płomienia wyładowaniem koronowym

Jeszcze wyraźniejszy efekt stabilizacji płomieni gazowych stwierdzono po zastosowaniu wyładowań koronowych w płomieniu, w układzie elektrod podobnym jak na rysunku 3.6a [46]. W tym przypadku także nie ma zgodności co do dominującego mechanizmu stabilizacji płomienia. Należy wziąć pod uwagę trzy ważne czynniki: generację ozonu ( $O_3$ ), wydzielanie się ciepła podczas wyładowania koronowego i zmianę składu paliwa. *Bradley i Nesser* [46] sugerują, że prawdopodobnie przeważa cieplny efekt stabilizacji, wywołany nagrzewaniem się katody podczas wyładowań koronowych.

Istnieje jeszcze jeden czynnik poprawiający stabilność płomieni węglowodorowych, a mianowicie powstawanie podczas wyładowania koronowego wodoru i acetyleny z metanu [46]. Obecność  $H_2$  i  $C_2H_2$  w palnej mieszance ułatwia jej zapłon i rozszerza granice palności.

### 3.6. Stabilizacja płomieni pyłowych plazmą

W zależności od charakteru wyładowania elektryczne cechują się różnym stopniem oddziaływania na procesy spalania. Ze względu na znacznie większą wartość minimalnej energii zapłonu pyłów niż gazów [70], do stabilizacji płomieni pyłowych nadaje się plazma termiczna, która charakteryzuje się dużą koncentracją energii i wysoką temperaturą [36]. Potwierdzają to wyniki badań pracy [71] wskazujące, że plazma może być stosowana do zapłonu węgla o różnej zawartości części lotnych i wartości opałowej. Wyniki pracy [72] pokazały, że zużycie energii na zapłon i stabilizację płomienia pyłowego przy pomocy plazmy jest mniejsze w stosunku do niezbędnej energii chemicznej paliw gazowych czy ciekłych.

Mechanizm zapłonu pyłu węglowego przy pomocy plazmy nie jest jeszcze w pełni poznany, na pewno ważny jest „szok termiczny” powodujący gwałtowny rozkład termiczny węgla, ale nie jest jasna rola rodników obecnych w plazmie w procesie inicjacji i rozwoju spalania (płomienia).

### 3.6.1. Mechanizm plazmowego zapłonu pyłu węglowego

Oddziaływanie plazmy na pył węglowy wywołuje szereg procesów fizycznych i chemicznych (Rys. 3.7) [73]. Najważniejsze dla techniki spalania procesy fizyczne zachodzące w węglu pod działaniem plazmy to: szybkie nagrzewanie ( $10^3 \div 10^4$  deg/s) cząstek węgla, gwałtowny rozkład termiczny substancji organicznej skutkujący raptownym wydzielaniem części lotnych i rozpadem cząstek węgla do rozmiarów poniżej  $5 \mu\text{m}$  [74].

Procesy chemiczne towarzyszące zmianom fizycznym, to przede wszystkim wydzielenie w wyniku pirolizy lotnych i ciekłych produktów rozkładu substancji organicznej ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , pirydyna  $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$ , pirol  $\text{C}_4\text{H}_5\text{N}$ ) oraz dysocjacja termiczna wielu produktów gazowych rozkładu z wytworzeniem rodników ( $\text{H}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{NH}$ ,  $\text{CH}$ ,  $\text{CH}_3\ldots$ ), a ponadto jonizacja i tworzenie się jonów dodatnich ( $\text{C}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{Si}^+$ ,  $\text{K}^+$  i inne) oraz ujemnych ( $\text{O}^-$ ,  $\text{H}^-$ ,  $\text{N}^-$  i inne) (Rys. 3.7) [68].

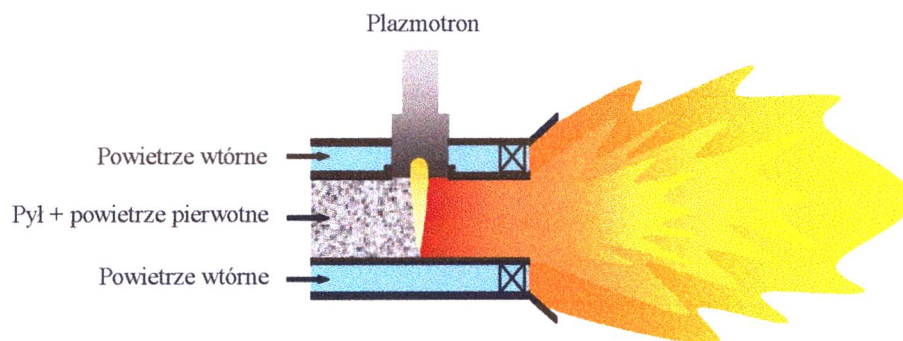


Rys. 3.7. Oddziaływanie plazmy na pył węglowy

W wyniku oddziaływania plazmy na pył węglowy powstaje wysokoreakcyjna mieszanka, która w kontakcie z tlenem szybko reaguje przyspieszając rozwój płomienia. Tłumaczy to dlaczego ciągłe wyładowanie plazmowe w palniku pyłowym efektywnie stabilizuje płomień pyłowy.

### 3.6.2. Plazmowe palniki pyłowe

Zasada działania pyłowego palnika plazmowego polega na wprowadzeniu plazmy do przewodu, którym przepływa mieszanka pyłowo – powietrzna. W kontakcie cząstek węgla z plazmą następuje gwałtowne wydzielanie części lotnych, rozpad cząstek i zapłon. W efekcie otrzymuje się stabilny płomień pyłowy, który jest wydmuchiwany do komory paleniskowej. Źródłem wytwarzanej w wyładowaniu łukowym plazmy jest plazmotron. Schemat plazmowego palnika pyłowego przedstawia rysunek 3.8.



Rys. 3.8. Schemat plazmowego palnika pyłowego

Plazmowy system zapłonowy składa się z: plazmotronu, wstępnej komory spalania oraz układów zasilania elektrycznego, automatyki i pomiarów. W kotle pyłowym uzupełnieniem jest palnik dużej mocy (10 MW) stabilizowany płomieniem z plazmowego palnika pyłowego. Zasady konstrukcji plazmowych palników pyłowych nie są w pełni opracowane. Istotne problemy do rozwiązania to takie kształtowanie aerodynamiki plazmy i przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej, żeby nie spalić palnika, ale uzyskać możliwie szeroki zakres jego stabilnej pracy. Wiele problemów istnieje po stronie elektrycznej tego systemu zapłonowego: ochrona przeciwzakłóceńowa, rodzaj zasilacza plazmotronu i rozwiązanie układu elektrod.



## 4. Plazmowy rozruch kotłów pyłowych

W polskiej energetyce zawodowej rozruch kotłów pyłowych, a także fluidalnych, odbywa się przy pomocy palników mazutowych. Zużycie ciężkiego oleju podczas jednego rozruchu kotła ze stanu zimnego zależnie od jego wydajności przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1

Zużycie mazutu podczas rozruchu kotła ze stanu zimnego [75]

| Wydajność kotła,<br>Mg/h | Zużycie mazutu podczas jednego rozruchu,<br>Mg |
|--------------------------|------------------------------------------------|
| 50 ÷ 120                 | 3 ÷ 8                                          |
| 160 ÷ 320                | 10 ÷ 25                                        |
| 420 ÷ 650                | 30 ÷ 75                                        |
| 950 ÷ 1150               | 120 ÷ 350                                      |
| 1650                     | 400                                            |
| 2650                     | 550                                            |

Proces rozruchu kotła z użyciem mazutu jest czasochłonny i wiąże się ze stratami ekonomicznymi oraz zanieczyszczeniem środowiska. Straty związane z rozruchem kotła, zwane stratami rozruchowymi, obniżają sprawność bloku energetycznego.

### 4.1. Rozruch kotła pyłowego

Procedura uruchamiania kotła pyłowego, a w szczególności przygotowania układu rozruchowego, jest bardzo złożona. Wynika ona z wielu uwarunkowań, z których najważniejszym jest stan termiczny bloku energetycznego (kotła, rurociągów, turbiny i innych urządzeń pomocniczych). Stan ten zależy głównie od sposobu odstawienia bloku, jego studzenia, czasu postoju oraz indywidualnych warunków towarzyszących takich jak: stan izolacji poszczególnych elementów, temperatura otoczenia, sposób przygotowania układu próżniowego turbiny.

Na podstawie danych, przedstawionych przez producentów urządzeń, doświadczeń z eksploatacji bloków oraz wyników różnych analiz, można określić podstawowe zasady i warunki procesu uruchamiania kotła. Wyróżnia się dwa zasadnicze rodzaje uruchomień kotła:

- uruchomienie ze stanu zimnego (w którym temperatura wszystkich elementów grubościennych kotła jest mniejsza od 100 °C a kocioł jest rozprężony),



- uruchomienie ze stanu gorącego (w którym temperatura elementów grubościennych kotła jest wyższa od 100 °C a ciśnienie pary pierwotnej jest wyższe od 0,4 MPa).

Ze względów ekonomicznych, czas rozruchu kotła pyłowego powinien być jak najkrótszy, ale z powodu stosowania różnych materiałów i konieczności utrzymania odpowiednich parametrów technicznych, nie można go przyspieszać. Elementami grubościennymi kotła, ograniczającymi czas rozruchu są: separator, filtr, mieszalnik, pompy cyrkulacyjne, komora wylotowa pary świeżej, komora wylotowa pary wtórnej. Innymi częściami wpływającymi na czas rozruchu kotła są węzownice przegrzewaczy pary usytuowane w strefie ogniowej (wewnętrzne rury wieszakowe oraz przegrzewacz naścienny).

#### **4.1.1. Uruchamianie kotła ze stanu zimnego**

Po zrealizowaniu programu wietrzenia i ustabilizowaniu parametrów pracy układu powietrze – spaliny uruchamia się palniki rozpałkowe (obciążenie cieplne kotła wynosi wówczas około 10%). Od początku uruchamiania kotła należy rozpocząć proces wygrzewania zespołów młynowych, wykorzystując możliwość podgrzania powietrza pierwotnego w podgrzewaczu powietrza.

W pierwszej fazie rozruchu kotła, do czasu pojawienia się pary (do temperatury wody w parowniku 100 °C), o szybkości obciążania kotła decyduje kryterium wytrzymałościowe separatora oraz temperatura węzownic przegrzewaczy. Charakterystycznym dla tego okresu rozruchu kotła jest brak przepływu pary przez przegrzewacze. Stwarza to szczególne niebezpieczeństwo uszkodzenia elementów kotła, a w szczególności przegrzewaczy pary. Z uwagi na szybki wzrost temperatury metalu przegrzewaczy, należy tak regulować obciążenie komory paleniskowej (ilością palników rozruchowych), by nie dopuścić do przekroczenia dopuszczalnych maksymalnych temperatur, a jednocześnie dążyć do skrócenia do niezbędnego minimum okresu niekorzystnej bezprzepływowej pracy przegrzewaczy.

W warunkach dostatecznego chłodzenia rur wieszakowych i przegrzewacza naściennego, objawiającym się wyraźnym spadkiem temperatury ich ścianek, można włączyć kolejne palniki rozpałkowe zwiększając obciążenie cieplne komory paleniskowej do około 20%. Przy odpowiednio dużym przepływie pary za separatorem uruchamia się pozostałe palniki rozpałkowe, zwiększając obciążenie cieplne komory paleniskowej do 30%.

Następnie przystępuje się do uruchomienia pierwszego w kolejności młyna. Najkorzystniejsze na tym etapie rozruchu jest załączanie młynów zasilających dolne sekcje palników pyłowych, w celu uzyskania przyrostu obciążenia cieplnego kotła bez gwałtownego przyrostu temperatury pary świeżej i wtórnej. Proces uruchamiania i obciążania młyna należy przeprowadzić zgodnie z zasadami podanymi w stosownej instrukcji eksploatacji, zwracając szczególną uwagę na prawidłowe wygrzanie i odpowiednią wentylację młyna.

Kolejno dołącza się pozostałe młyny (na minimalnym obciążeniu) wygaszając poszczególne palniki rozruchowe. Stopniowo zwiększa się obciążenie zespołów młynowych (do uzyskania wymaganej mocy bloku), jednocześnie zwiększając obciążenie cieplne kotła.

#### **4.1.2. Uruchamianie kotła ze stanu gorącego**

W tym przypadku szybkość wzrostu obciążenia cieplnego kotła powinna być taka sama, jak dla rozruchu kotła ze stanu zimnego. W celu niedopuszczenia do nadmiernego schładzania elementów grubościennych rurociągu pary świeżej znajdujących się na drodze przepływu chłodnej pary rozruchowej, należy sprawdzić czy temperatury elementów najbardziej narażonych na schłodzenie spełniają warunek zezwalający na rozruch.

Jeżeli warunek ten nie został spełniony, należy prowadzić proces kontrolowanego rozprężenia kotła, aż do osiągnięcia stanu umożliwiającego bezpieczne uruchomienie kotła. Z kontrolowanego rozprężenia kotła można zrezygnować w przypadku, gdy rozpalenie kotła odbywać się będzie po krótkotrwałym jego postoju. Wtedy bowiem warunki temperaturowe elementów grubościennych pozwalają na natychmiastowy rozruch kotła.

Po ustabilizowaniu się przypływu wody przez podgrzewacz wody zapewniającego stabilną bezkawitacyjną pracę pompy cyrkulacyjnej, ustabilizowaniu się poziomu wody w separatorze, przewietrzeniu kotła i uzyskaniu odpowiedniego przypływu pary przez przegrzewacze, rozpala się symetrycznie dolne palniki rozruchowe.

Kontrolując temperaturę metalu rur wieszakowych i przegrzewacza naściennego, w zależności od tendencji przyrostu tych temperatur i ich wartości, rozpala się kolejne, środkowe i następnie górne palniki rozruchowe regulując odpowiednio obciążenie cieplne komory do 30% obciążenia znamionowego.

W zależności od stanu cieplnego kotła załącza się kolejno młyny zaczynając od najniższych rzędów, odpowiednio je obciążając z równoczesnym wyłączaniem

poszczególnych palników rozruchowych. Po uzyskaniu parametrów pary wymaganych przez turbinę rozpoczyna się jej uruchomienie.

## 4.2. Straty rozruchowe bloku

Straty rozruchowe bloku są kosztami, które są konsekwencją ruchu przerywanego bloku i obejmują: wyłączenie z ruchu bloku (rozpoczęcie zaniżania obciążenia), postój bloku, uruchomienie bloku (uzyskanie równowagi cieplnej).

Z punktu widzenia bilansu energii straty rozruchowe są nadwyżką energii doprowadzonej do bloku w czasie jego cyklu rozruchowego, w postaci paliwa pomocniczego i podstawowego oraz dodatkowych strumieni energii (para obca, podgrzane powietrze, energia elektryczna), nad energię doprowadzoną, która byłaby niezbędna do wyprodukowania równoważnej energii użytecznej w ruchu ustalonym bloku [76].

### 4.2.1. Przykład strat rozruchowych bloku w *Elektrowni Bełchatów*

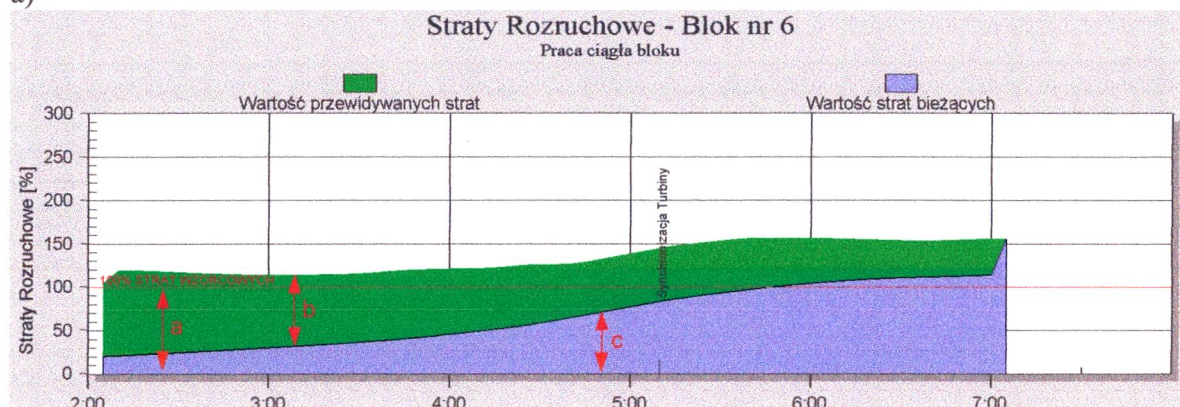
*Elektrownia Bełchatów* ma 12 bloków o mocy 360 MW, z kotłami pyłowymi BB 1150 opalanych węglem brunatnym. Do rozruchu kotłów stosuje się palniki mazutowe.

Na rysunku 4.1a przedstawiono wykresy strat rozruchowych jednego z bloków energetycznych *Elektrowni Bełchatów*. Pole oznaczone kolorem niebieskim i opisane jako wartość strat bieżących wyraża bieżącą wartość wszystkich strat w procentach względem początkowej wartości strat wzorcowych i jest równe stosunkowi wartości strat bieżących do wartości strat wzorcowych. Chwilowa wartość tych strat została oznaczona strzałką z opisem *c*. Pole oznaczone kolorem zielonym (położone w całości nad polem niebieskim) wyraża bieżącą wartość przewidywanych strat jakie zostaną poniesione od chwili bieżącej do końca rozruchu, pod warunkiem optymalnego prowadzenia bloku tj. prowadzenia rozruchu zgodnie z założeniami technologicznymi. Wartość chwilowa wykresu wyrażona w procentach względem wartości początkowej strat wzorcowych została oznaczona strzałką z opisem *b*. Pozioma, czerwona linia wyraża wartość strat rozruchowych (strat teoretycznych wyznaczonych na początku rozruchu na podstawie wyjściowego stanu cieplnego bloku) i wyznacza 100% strat dla danego rozruchu [76].

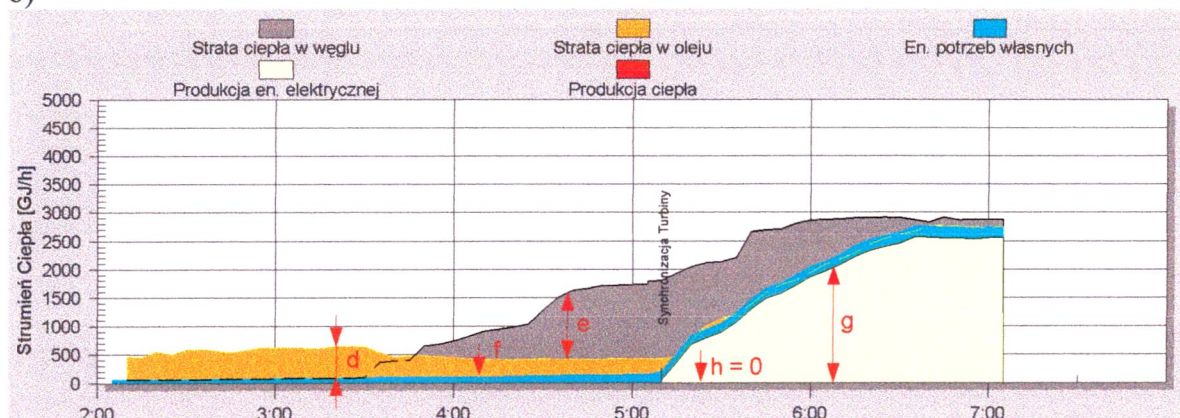
Na rysunku 4.1b przedstawiono przebieg w czasie rozruchu strumieni strat ciepła (w GJ/h) dostarczonego w oleju (d), węgla (e), energii potrzeb własnych (po przeliczeniu na strumień ciepła) (f), oraz strumieni ciepła użytecznego wytworzonego w energii elektrycznej (g) i w parze technologicznej (h). Jest to więc wykres bilansowy strumieni

ciepła dostarczonego i użytecznego, których różnica stanowi strumień strat rozruchowych [76].

a)



b)



Rys. 4.1. Straty ciepłne podczas rozruchu kotła w *Elektrowni Belchatów* [76]:  
straty rozruchowe bloku (a), przebieg zmian strumieni strat ciepła w czasie rozruchu (b)

### 4.3. Plazmowy rozruch kotła pyłowego

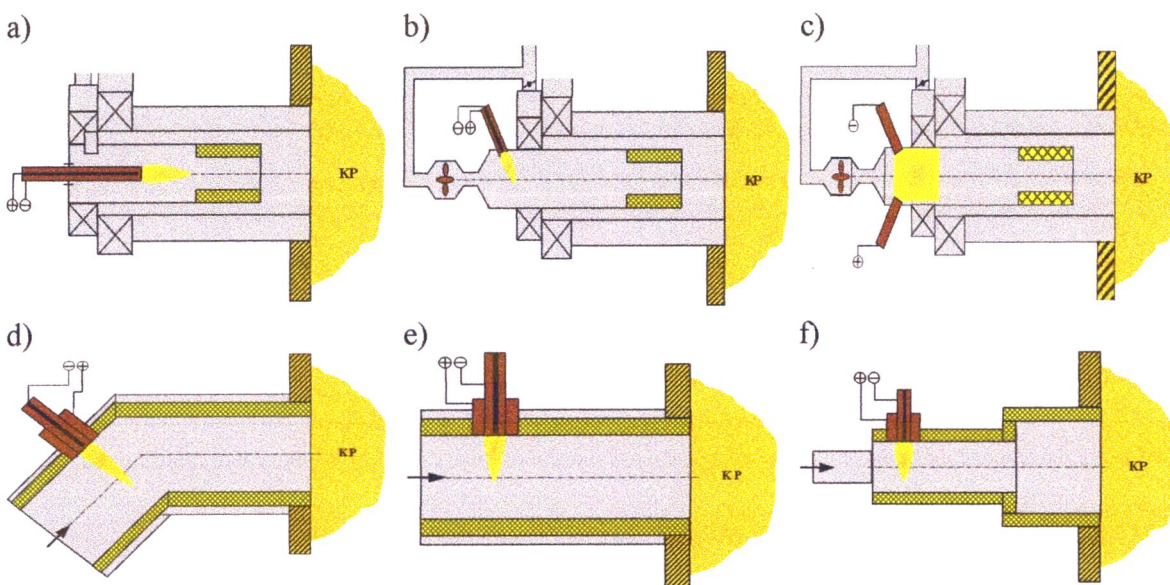
Procedura plazmowego rozruchu kotła pyłowego jest zbliżona jak rozruchu z zastosowaniem palników olejowych czy gazowych. Wymagany czas wygrzania komory paleniskowej oraz żądane parametry cieplne kotła pyłowego nie ulegają zmianie, co ma duże znaczenie ekonomicznie przy wyborze tego systemu [21].

Istota plazmowego rozruchu kotła pyłowego polega na tym, że od stanu zimnego kotła pracują dysze pyłowe, na których zostały zainstalowane plazmotrony. Pozostałe palniki pyłowe są uruchamiane stopniowo po osiągnięciu wymaganych parametrów termicznych komory paleniskowej i innych elementów oraz urządzeń ściśle związanych z prawidłową pracą kotła pyłowego [24].



### 4.3.1. Umieszczenie plazmotronu w palniku pyłowym

Wprowadzenie plazmy do mieszanki pyłowo – powietrznej musi zapewnić jej zapłon i stabilne spalanie, dlatego ważne jest odpowiednie umieszczenie plazmotronu w palniku pyłowym. Sposób umieszczenia plazmotronu w określonej dyszy pyłowej zależy przede wszystkim od: typu plazmotronu, rodzaju palnika pyłowego (wirowy, strumieniowy czy muflowy) oraz rodzaju spalanego węgla. Przykłady instalacji plazmotronów w dyszy pyłowej pokazano na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Umieszczenie plazmotronu w dyszy palnika pyłowego [21, 24]:  
wirowego (a, b, c), strumieniowego (d, e), muflowego (f)

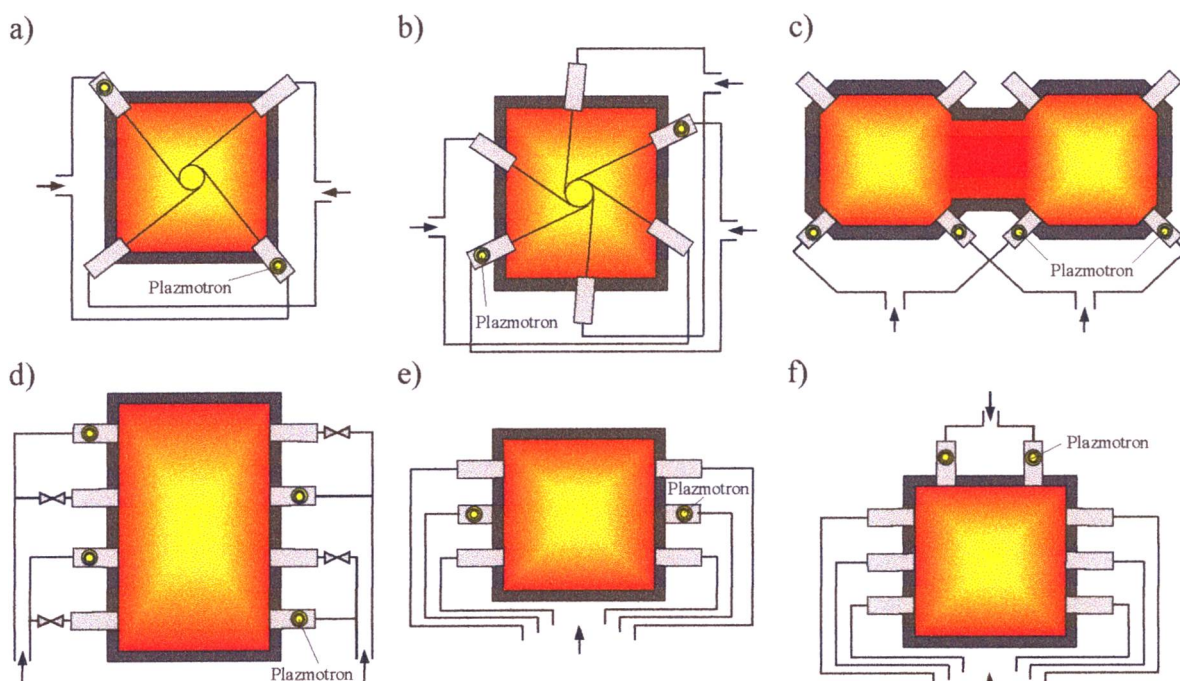
### 4.3.2. Rozmieszczenie plazmowych palników pyłowych w kotle pyłowym

Ważnym zagadnieniem przy wykorzystaniu plazmy do rozruchu kotła pyłowego i stabilizacji płomienia pyłowego jest właściwy dobór liczby plazmowych palników pyłowych i ich odpowiednie rozmieszczenie w komorze paleniskowej, ponieważ będą one miały duży wpływ na pracę pozostałych dysz pyłowych i całego kotła. O liczbie i miejscu plazmotronów (wyborze dyszy palnikowej), niezbędnych do zainstalowania w kotle, decyduje przede wszystkim wydajność cieplna kotła pyłowego, rodzaj paleniska oraz moc plazmotronu (Tabela 4.2). Plazmotron powinien być instalowany w dolnym rzędzie palnikowym, ponieważ powoduje to, że uruchamiane powyżej w późniejszym czasie palniki pyłowe będą dodatkowo stabilizowane przez palnik wyposażony w plazmowy system zapłonowy. Przykłady rozmieszczenia plazmotronów w kotle pyłowym przedstawiono na rysunku 4.3.

Tabela 4.2

Moc jednostkowa plazmotronu oraz liczba plazmotronów zainstalowanych w kotle w zależności od jego wydajności [21, 24, 77]

| Wydajność kotła<br>Mg/h | Liczba plazmotronów<br>przypadających na kocioł | Moc plazmotronu<br>kW                                                |
|-------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 50 ÷ 75                 | 1                                               | Zależnie od typu paleniska<br>i rodzaju spalanego paliwa<br>60 ÷ 200 |
| 120 ÷ 180               | 2                                               |                                                                      |
| 210 ÷ 320               | 3                                               |                                                                      |
| 420 ÷ 500               | 4                                               |                                                                      |
| 650 ÷ 950               | 6 ÷ 8                                           |                                                                      |
| 1150 ÷ 1650             | 10 ÷ 12                                         |                                                                      |



Rys. 4.3. Przykłady rozmieszczenia plazmotronów w komorze paleniskowej kotła pyłowego [21, 24]

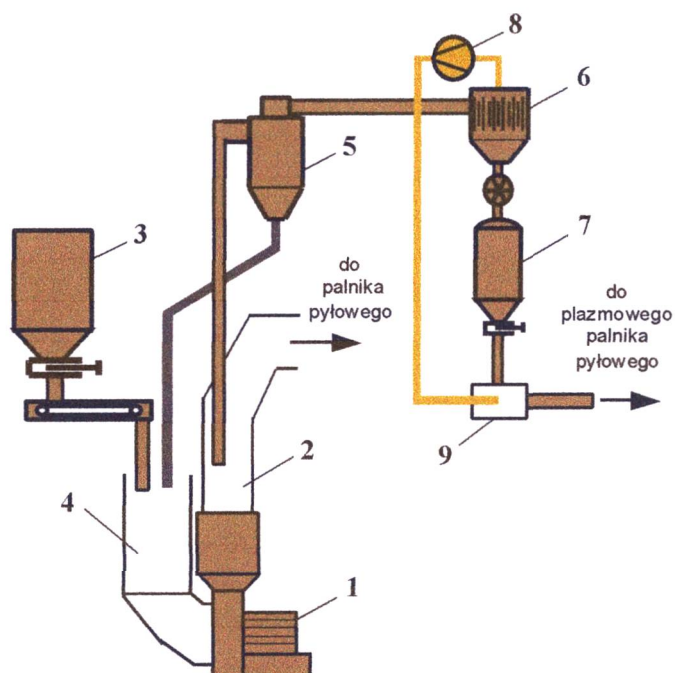
#### 4.3.3. Przygotowanie pyłu węglowego do plazmowego rozruchu kotła pyłowego

W przypadku uruchamiania kotła za pomocą palników olejowych czy gazowych, nie jest konieczne wcześniejsze przygotowanie pyłu węglowego do spalania w kotle pyłowym, ponieważ do wygrzania komory paleniskowej i instalacji młynowej wykorzystywane są gorące spaliny ze spalania oleju lub gazu. Po osiągnięciu niezbędnej minimalnej temperatury młyna węglowego następuje jego włączenie i zasilanie węglem, a otrzymany pył węglowy jest podawany do palników pyłowych.



Przy plazmowym rozruchu kotła pyłowego wymagane jest wcześniejsze przygotowanie pyłu węglowego, gdyż uruchomienie zimnego młyna spowoduje jego zalepienie i zasypanie świeżym paliwem. Jest wiele rozwiązań instalacji młynowych, a sposób zapewnienia zasilania kotłów pyłowych pyłem węglowym zależy od wymogów i możliwości elektrowni czy elektrociepłowni. Wyróżnia się dwa typy instalacji młynowych: młynownie indywidualne (przynależne do jednego kotła pyłowego) i centralne młynownie z pośrednim bunkrowaniem pyłu węglowego.

W elektrowniach z centralną młynownią pył węglowy może być pobierany ze zbiornika głównego i kierowany do odpowiednich dysz palnika pyłowego. W przypadku młynowni indywidualnych konieczna jest budowa dodatkowej instalacji do magazynowania pyłu węglowego w zbiorniku przykotłowym. Przykład instalacji przygotowania pyłu węgla brunatnego do plazmowego rozruchu kotła pyłowego *OP-650b* w *Elektrowni Turów* zaprojektowany przez autora pracy przedstawiono schematycznie na rysunku 4.4.



Rys. 4.4. Schemat instalacji przygotowania pyłu węglowego do rozpalania kotłów pyłowych:

- 1 – młyn węglowy, 2 – kanał pyłowy, 3 – zasobnik główny węgla, 4 – rurosuszarka,  
5 – filtr cyklonowy, 6 – filtr tkaninowy, 7 – zasobnik przykotłowy pyłu,  
8 – wentylator wyciągowy, 9 – iniektor

Istnieje również możliwość (w przypadku pracy innych bloków) dobudowania kanału spalin, którym będą pobierane gorące spaliny z pracującego kotła do wygrzania młyna przynależnego do uruchamianego kotła. Pozwala to na uniknięcie budowy zbiornika przykotłowego na pył węglowy.

#### 4.4. Wady i zalety plazmowego systemu rozruchu kotłów pyłowych

Należy zaznaczyć, że wymienione układy rozruchowe kotłów mają w dużej mierze charakter teoretyczny, ponieważ plazmowa technika rozruchu kotłów pyłowych nie jest jeszcze dojrzała, a wiedza o niej opiera się na dość niepewnych informacjach ze źródeł rosyjskich. Na podstawie wymienionych cech plazmowych palników pyłowych można wskazać następujące zalety rozruchu kotłów przy ich zastosowaniu [21, 24, 36, 68, 77]:

- brak dodatkowego paliwa,
- brak dymienia podczas rozruchu,
- brak niebezpieczeństwa wycieku mazutu,
- likwidacja dużej i złożonej instalacji mazutowej,
- mniejsza emisja  $NO_x$ ,
- wzrost sprawności kotła pyłowego,
- brak ingerencji plazmowego systemu rozruchowego w komorę paleniskową (brak dodatkowych odgięć rur parownika w komorze paleniskowej),
- możliwość automatyzacji procesu plazmowego rozpalania kotła pyłowego,
- brak ruchomych części mechanicznych plazmowego systemu zapłonowego, co obniża jego awaryjność,
- niskie koszty utrzymania instalacji w ruchu oraz jej eksploatacji,
- oszczędności ekonomiczne (niższy koszt węgla w stosunku do oleju ciężkiego i gazu palnego).

Istnieje jednak jeszcze wiele przeszkód technologicznych w opracowaniu profesjonalnych plazmowych systemów rozruchowych kotłów energetycznych, do których należą między innymi:

- trwałość plazmotronu,
- zapewnienie pyłu węglowego i jego podawania podczas rozruchu kotła ze stanu zimnego,
- bezpieczeństwo działania plazmowej instalacji rozruchowej.

## 5. Cele i tezy pracy

Motywacją do podjęcia pracy badawczej były problemy z użytkowaniem mazutu w energetyce zawodowej do rozruchu kotłów pyłowych opalanych węglem i doniesienia o możliwości zastosowania plazmy do stabilizacji płomienia pyłowego [36]. Dodatkowym impulsem było wyraźne zainteresowanie krajowych elektrowni i elektrociepłowni plazmową metodą rozruchu kotłów i możliwością obniżenia minimum technicznego kotłów.

Wiadomo o próbach użycia plazmy do rozruchu kotłów pyłowych przez ośrodki badawcze w byłym Związku Radzieckim, ale ze względów komercyjnych trudno uzyskać niezbędne informacje dla zastosowania tej metody w praktyce. Z tego powodu także w niektórych krajach wysokorozwiniętych podjęto ostatnio tą tematykę badając warunki zastosowania plazmy do zapłonu i stabilizacji płomienia pyłowego [71, 72]. Biorąc pod uwagę fakt, że polskie elektrownie zawodowe opalane są węglem oraz, że ciekłe paliwa węglowodorowe są importowane, wydaje się celowe lepsze poznanie możliwości i ograniczeń plazmowych systemów zapłonowych mogących mieć zastosowanie do rozruchu kotłów pyłowych, a także pieców cementowych.

### Cele pracy:

1. Poznanie warunków zapłonu pyłu węglowego plazmą.
2. Określenie wpływu właściwości paliw stałych na zakres działania plazmowego palnika pyłowego.
3. Wyznaczenie parametrów eksploatacyjnych plazmowego palnika pyłowego.
4. Teoretyczna interpretacja efektu stabilizacji płomienia pyłowego plazmą.

### Tezy pracy:

1. W mechanizmie zapłonu pyłu węglowego plazmą znaczenie ozonu i jonizacji jest marginalne.
2. Czynnikiem decydującym o uszeregowaniu paliw stałych do plazmowego palnika pyłowego jest prędkość propagacji płomienia pyłowego.
3. Modelem dla plazmowego palnika pyłowego może być reaktor chemiczny z doskonałym wymieszaniem, w którym plazma stanowi dodatkowe źródło ciepła.

## 6. Charakterystyka paliw użytych w badaniach, stanowisko badawcze i aparatura pomiarowa

### 6.1. Charakterystyka paliw

W badaniach użyto następujące paliwa stałe: węgiel kamienny, węgiel brunatny, drewno i łupek powęglowy.

#### 6.1.1. Przygotowanie paliw do badań nad wpływem wyladowań koronowych na zapłon pyłu węglowego

W celu zbadania wpływu wyladowań koronowych na zapłon pyłu węglowego użyto dwa węgle brunatne (z *KWB Turów* i *KWB Adamów*) i jeden węgiel kamienny (pobrane z *EC Czechnica*). Węgle zostały zmielone, wysuszone i rozfrakcjonowane. Do badań użyto po dwie próbki każdego z węgla o następujących frakcjach:  $d_o = 50 \div 80 \mu\text{m}$  i  $d_o < 50 \mu\text{m}$ . Wyniki analizy technicznej i elementarnej węgla przedstawiono w tabeli 6.1.

Tablica 6.1

Analiza techniczna i elementarna użytych paliw stałych

|                       |         |        | Rodzaj paliwa                  |                 |                 |
|-----------------------|---------|--------|--------------------------------|-----------------|-----------------|
|                       |         |        | Węgiel kamienny                | Węgiel brunatny | Węgiel brunatny |
| Miejsce pobrania pyłu |         |        | Elektrociepłownia<br>CZECHNICA | KWB<br>TURÓW    | KWB<br>ADAMÓW   |
| Analiza techniczna    |         |        |                                |                 |                 |
| Wartość opałowa       | $Q_i^a$ | MJ/kg  | 23,86                          | 17,28           | 14,24           |
| Ciepło spalania       | $Q_s^a$ | MJ/kg  | 24,76                          | 18,61           | 15,80           |
| Wilgoć                | $W^a$   | %      | 8,74                           | 10,10           | 7,3             |
| Części lotne          | $V^a$   | %      | 25,39                          | 35,40           | 33,60           |
| Popiół                | $A^a$   | %      | 22,70                          | 21,10           | 23,64           |
| Analiza elementarna   |         |        |                                |                 |                 |
| Węgiel                | $C^a$   | % mas. | 53,06                          | 50,01           | 50,67           |
| Wodór                 | $H^a$   | % mas. | 6,33                           | 5,06            | 5,63            |
| Azot                  | $N^a$   | % mas. | 0,67                           | 0,64            | 0,70            |
| Siarka                | $S^a$   | % mas. | 0,67                           | 0,53            | 0,49            |
| Tlen                  | $O^a$   | % mas. | 7,83                           | 12,56           | 11,57           |

### 6.1.2. Przygotowanie paliw do badań nad wpływem plazmy termicznej na zapłon i stabilizację płomienia pyłowego

Paliwa stałe (węgiel kamienny, węgiel brunatny, drewno, łupek powęglowy) użyte do badań wpływu plazmy termicznej na zapłon i stabilizację płomienia pyłowego zostały wysuszone, zmielone i rozfrakcjonowane. Wyniki ich analizy technicznej i elementarnej przedstawiono w tabeli 6.2.

Tablica 6.2

Analiza techniczna i elementarna użytych paliw stałych

|                       |         |        | Rodzaj paliwa               |                   |                |                   |
|-----------------------|---------|--------|-----------------------------|-------------------|----------------|-------------------|
|                       |         |        | Węgiel kamienny             | Węgiel brunatny   | Pył drzewny    | Łupek powęglowy   |
| Miejsce pobrania pyłu |         |        | Elektrociepłownia CZECHNICA | Elektrownia TURÓW | Zakład STOLBUD | Cementownia WARTA |
| Analiza techniczna    |         |        |                             |                   |                |                   |
| Wartość opałowa       | $Q_i^a$ | MJ/kg  | 25,33                       | 19,82             | 10,74          | 2,61              |
| Ciepło spalania       | $Q_s^a$ | MJ/kg  | 26,19                       | 21,0              | 11,73          | 2,9               |
| Wilgoć                | $W^a$   | %      | 1,6                         | 11,9              | 2,73           | 1,6               |
| Części lotne          | $V^a$   | %      | 24,95                       | 40,54             | 46,70          | 11,24             |
| Popiół                | $A^a$   | %      | 24,64                       | 19,46             | 47,04          | 78,12             |
| Analiza elementarna   |         |        |                             |                   |                |                   |
| Węgiel                | $C^a$   | % mas. | 60,79                       | 49,55             | 31,63          | 12,57             |
| Wodór                 | $H^a$   | % mas. | 3,78                        | 4,10              | 4,23           | 1,15              |
| Azot                  | $N^a$   | % mas. | 1,05                        | 0,56              | 0,32           | 0,25              |
| Siarka                | $S^a$   | % mas. | 0,51                        | 0,54              | 0,19           | 0,50              |
| Tlen                  | $O^a$   | % mas. | 7,63                        | 13,89             | 13,86          | 5,81              |

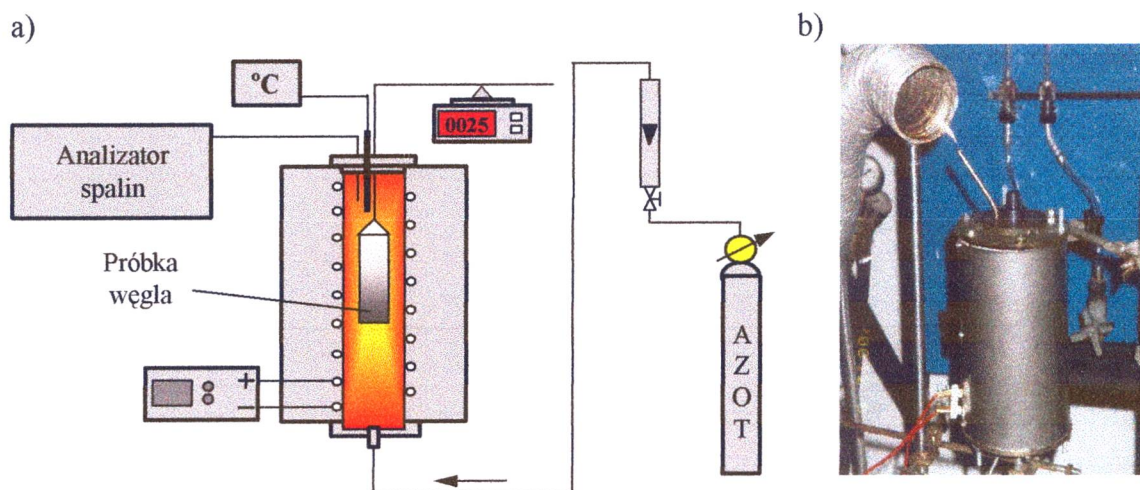
### 6.1.3. Przygotowanie koksów do badań wpływu części lotnych na zakres pracy w plazmowym palniku pyłowym

W badaniach nad wpływem roli części lotnych na stabilizację płomienia pyłowego użyto pyłu węgla brunatnego z *Elektrowni Turów* o frakcji cząstek  $d_o < 80 \mu\text{m}$ .

Koksy do badań otrzymano odgazowując zmielony węgiel brunatny w pionowym, elektrycznie ogrzewanym reaktorze typu złoża stałe. Reaktor wykonano z kwarcowej rury o długości 400 mm i średnicy wewnętrznej 50 mm. Podczas procesu odgazowania wewnątrz reaktora utrzymywano temperaturę w zakresie  $800 \div 850 \text{ }^\circ\text{C}$ . W celu utrzymania obojętnej atmosfery w czasie odgazowania do reaktora podawano azot (około  $0,056 \text{ dm}^3/\text{s}$ ).

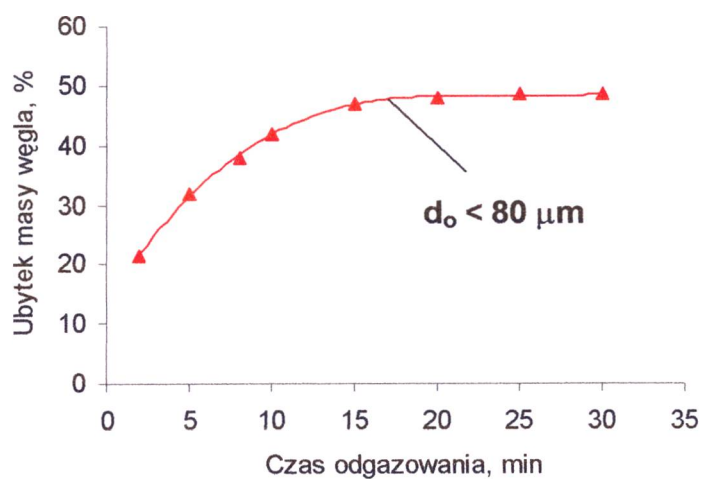
Schemat stanowiska do przygotowania koksów i reaktora do odgazowania przedstawiono na rysunku 6.1.



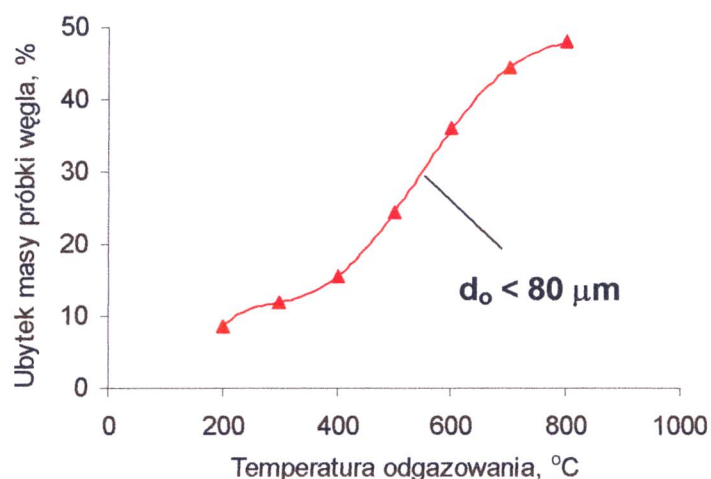


Rys. 6.1. Stanowisko do przygotowania koksów węgli brunatnych: schemat (a), widok reaktora wykorzystanego do odgazowania próbek węgla brunatnego (b)

W czasie odgazowania kosz z próbką węgla był zawieszony na dźwigni opartej na wadze elektronicznej, która podłączona do komputera *PC* umożliwiała rejestrację zmiany wagi próbki. Na rysunku 6.2 przedstawiono przebieg odgazowania próbki węgla brunatnego w temperaturze 800 °C, a na rysunku 6.3 wpływ temperatury na stopień odgazowania.



Rys. 6.2. Ubytek masowy próbki węgla brunatnego w czasie odgazowania w temperaturze 800 °C



Rys. 6.3. Wpływ temperatury na ubytek masy węgla brunatnego podczas odgazowania próbki (czas odgazowania 20 minut)

Uzyskane karbonizaty poddano analizie technicznej i elementarnej, których wyniki przedstawiono w tabeli 6.3.

Tablica 6.3

Analiza techniczna i elementarna koksów węgla brunatnego

|                 |         |        | Węgiel brunatny     |                  |                  |
|-----------------|---------|--------|---------------------|------------------|------------------|
|                 |         |        | Wyjściowy           | Odgazowany (23%) | Odgazowany (40%) |
|                 |         |        | Analiza techniczna  |                  |                  |
| Wartość opałowa | $Q_i^a$ | MJ/kg  | 19,82               | 13,33            | 13,21            |
| Ciepło spalania | $Q_s^a$ | MJ/kg  | 21,0                | 14,35            | 14,20            |
| Wilgoć          | $W^a$   | %      | 11,9                | 7,50             | 8,74             |
| Części lotne    | $V^a$   | %      | 40,54               | 31,46            | 24,07            |
| Popiół          | $A^a$   | %      | 19,46               | 23,62            | 27,69            |
|                 |         |        | Analiza elementarna |                  |                  |
| Węgiel          | $C^a$   | % mas. | 49,55               | 54,98            | 56,14            |
| Wodór           | $H^a$   | % mas. | 4,10                | 3,05             | 2,19             |
| Azot            | $N^a$   | % mas. | 0,56                | 0,59             | 0,62             |
| Siarka          | $S^a$   | % mas. | 0,54                | 0,47             | 0,41             |
| Tlen            | $O^a$   | % mas. | 13,89               | 9,79             | 4,21             |

## 6.2. Opis stanowisk badawczych i warunków badań

Ze względu na szeroki zakres badań i różne ich aspekty, stanowiska badawcze zostały tak zaprojektowane, aby umożliwić przeprowadzenie pomiarów w następujących czterech zagadnieniach tematycznych:

- wpływ wyładowań koronowych na zapłon pyłu węglowego,
- wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  oraz rodzaju i właściwości paliw na charakterystyki plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego i strumieniowego,
- badania właściwości płomieni stabilizowanych plazmą,
- emisja zanieczyszczeń płomieni pyłowych stabilizowanych plazmą.

### 6.2.1. Opis stanowiska badawczego i warunków badań nad wpływem wyładowań koronowych na zapłon pyłu węglowego

Badania nad wpływem wyładowań koronowych na zapłon pyłu węglowego przeprowadzono z zastosowaniem aparatu *Godberta – Greenwalda* służącego do wyznaczania temperatury zapłonu pyłów [27, 56]. Aparat *Godberta – Greenwalda* został odpowiednio zmodyfikowany do badań przez zmianę sposobu regulacji ciśnienia powietrza potrzebnego do wdmuchnięcia naważki pyłu do komory, zainstalowanie elektrody wyładowczej wewnątrz komory, dołączenie generatora wyładowań koronowych oraz wyposażenie stanowiska w komputerowy układ sterowania eksperymentem (Rys. 6.4).

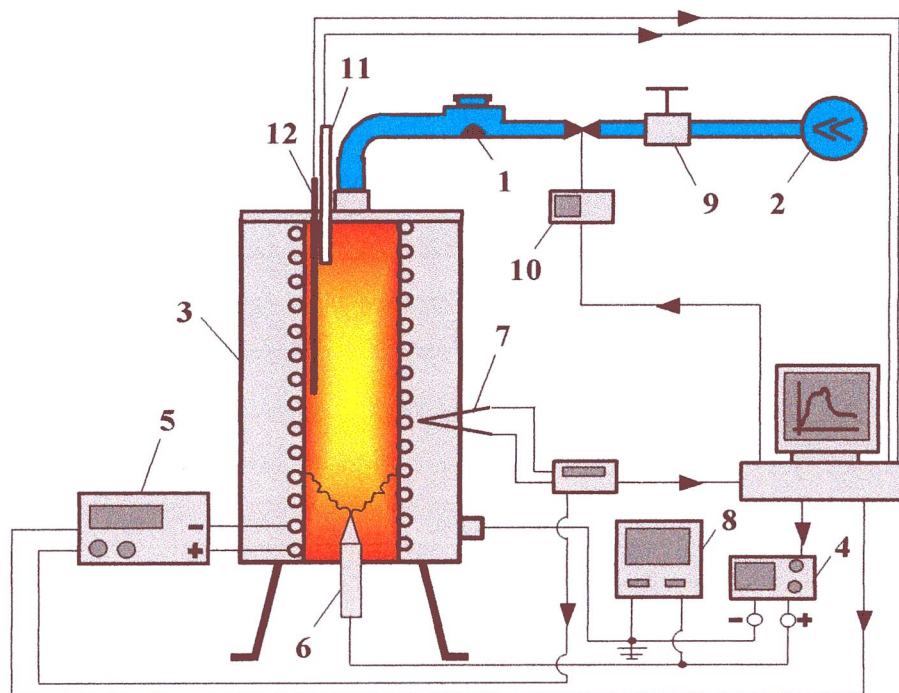
Wymiary komory wewnętrznej aparatu *Godberta – Greenwalda*, do której podawano naważkę pyłu, były następujące: średnica wewnętrzna  $d_k = 62$  mm, wysokość komory  $h_k = 350$  mm. W dolnej części komory zamocowano osiowo jedną elektrodę, drugą elektrodą była ściana wewnętrzna pieca. Elektroda wyładowcza była podłączona do generatora wyładowania o regulowanym napięciu w zakresie  $0 \div 7$  kV.

W górnej części komory został zamocowany układ podawania pyłu przy pomocy sprężonego powietrza. Warunki i parametry powietrza nośnego pyłu węglowego były następujące:

- ciśnienie powietrza  $p = 0,09$  MPa,
- czas otwarcia zaworu elektromagnetycznego podającego powietrze  $t = 0,7$  s,
- masa naważki pyłu  $m_p = 0,2$  g.

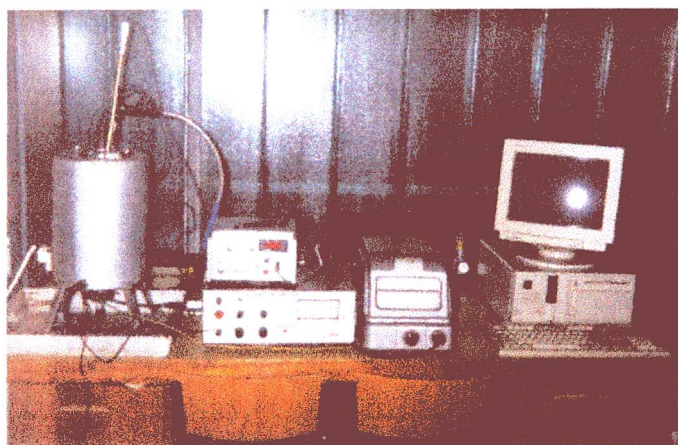
W celu pomiaru i kontroli temperatury wprowadzono od góry do pieca dwie termopary *Ni-CrNi*. Do obserwacji zapłonu węgla użyto fotodetektora optycznego umieszczonego również w górnej części komory. Całość eksperymentu była kontrolowana i sterowana przez komputer, a przebieg czasu indukcji zapłonu chmury pyłowej i towarzyszące efekty świetlne zapisywano w postaci graficznej na dysku. Schemat stanowiska laboratoryjnego oraz jego zdjęcie przedstawiono na rysunkach 6.4 i 6.5.





Rys. 6.4. Schemat stanowiska badawczego:

1 – pył węglowy, 2 – sprężone powietrze, 3 – aparat *Godberta – Greenwalda*,  
 4 – generator wyładowań elektrycznych, 5 – zasilacz, 6 – elektroda, 7 – termopara bloku,  
 8 – woltomierz elektrostacyjny  $VN$ , 9 – reduktor ciśnienia, 10 – zawór  
 elektromagnetyczny, 11 – fotodetektor, 12 – termopara w komorze zapłonowej



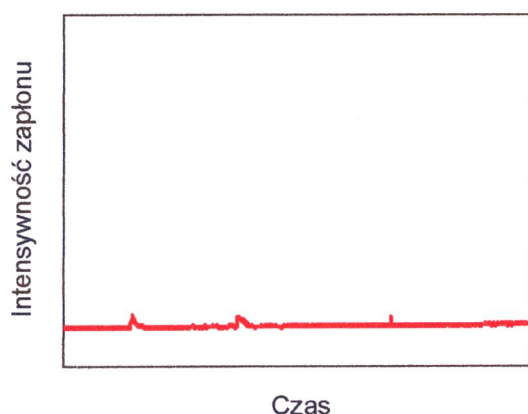
Rys. 6.5. Zdjęcie stanowiska laboratoryjnego

Badania przebiegały w ten sposób, że do nagrzanej do odpowiedniej temperatury komory aparatu *Godberta – Greenwalda* (3) wdmuchiowano mieszkankę pyłowo – powietrzną. Wdmuchnięcie nastąpiło po otwarciu zaworu (10), w wyniku czego powietrze (2) za reduktorem ciśnienia (9) podawało do wnętrza komory (przez odpowiedni przewód) pył węglowy (1) o masie 0,2 g. Wyładowanie koronowe następowało między centralnie umieszczoną elektrodą (6), a wewnętrzną ścianą pieca będącą drugą elektrodą. Napięcie wyładowania było mierzone woltmierzem (8) i zmieniane w zakresie  $0 \div 7$  kV.

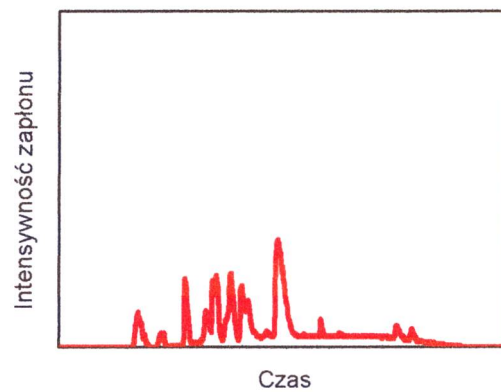
Temperatura w komorze zapłonowej oraz temperatura bloku były zadawane i stabilizowane za pomocą zasilacza z regulatorem elektronicznym (5) i mierzone odpowiednio termoparą *NiCr-Ni* (12) i (7).

Dla tak dobranych warunków mierzono temperaturę zapłonu pyłu węglowego określonej frakcji w zależności od napięcia wyładowania koronowego, dla obu polaryzacji napięcia. Moment zapłonu był rejestrowany przy pomocy fotodetektora (11) i zapisywany cyfrowo w pamięci komputera *PC*. Przykładowe historie intensywności światła identyfikujące zaistnienie zapłonu lub jego brak przedstawiono na rysunku 6.6.

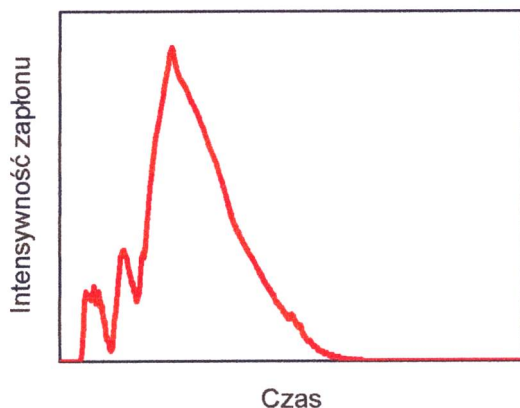
a) brak zapłonu



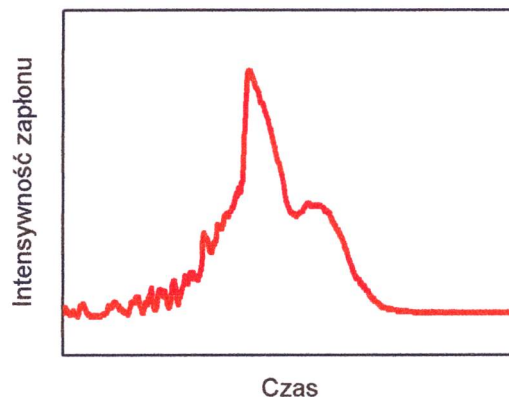
b) iskrzenie pojedynczych cząstek



c) zapłon chmury pyłowej



d) zapłon chmury pyłowej

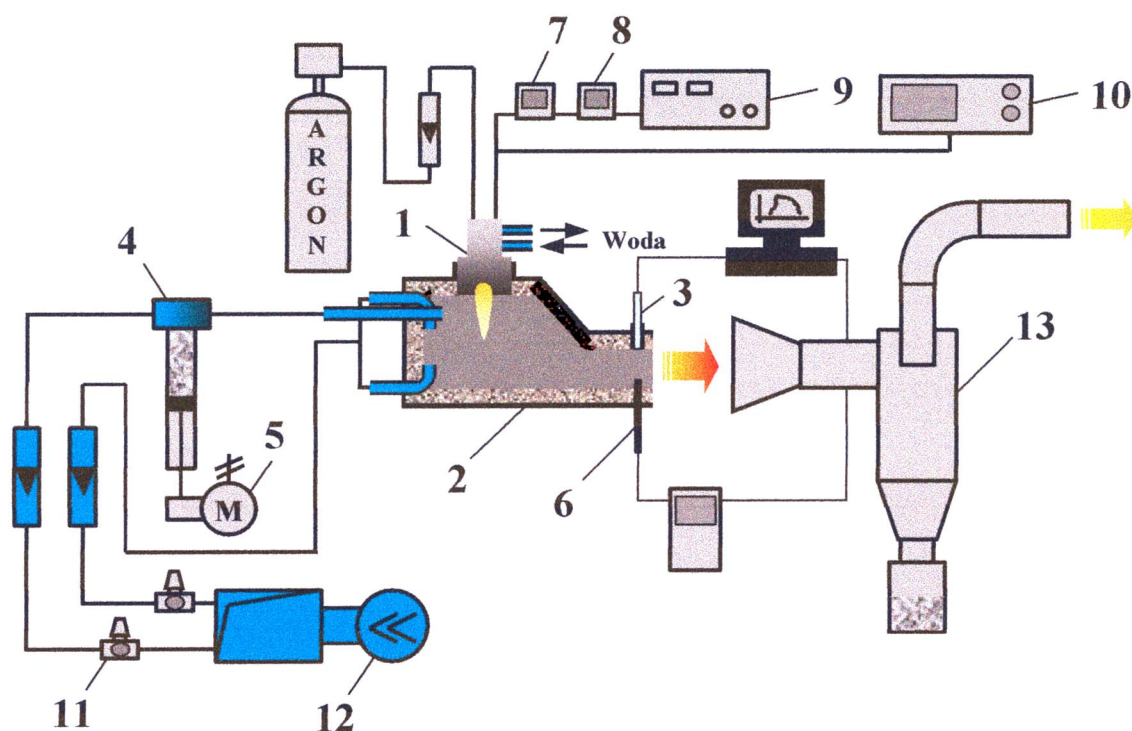


Rys. 6.6. Przykładowe przebiegi historii sygnału fotodetektora po wdmuchnięciu dawki pyłu do aparatu *Godberta – Greenwalda*



### 6.2.2. Opis stanowiska badawczego i warunków badań nad wpływem mocy elektrycznej plazmotronu $N_{el}$ oraz rodzaju i właściwości paliw na charakterystyki plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego i strumieniowego

Stanowisko laboratoryjne składało się z wyposażenia bazowego (Rys. 6.7), na którym przeprowadzono badania wpływu mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  oraz rodzaju i właściwości paliw na charakterystyki plazmowego palnika pyłowego (cyklonowego, strumieniowego), oraz dodatkowej aparatury dołączanej do stanowiska w zależności od rodzaju przeprowadzanych badań (Rys. 10.1 i 11.1).



Rys. 6.7. Schemat stanowiska do badania wpływu mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  oraz rodzaju i właściwości paliw na charakterystyki plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego

Stanowisko było wyposażone w komorę spalania (2), wykonaną z rury stalowej z wewnętrzną izolacją ceramiczną, o wymiarach wewnętrznych  $\phi 70 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  i części wylotowej komory o wymiarach  $\phi 24 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ . Wstępna komora spalania była zasilana pyłem z podajnika (4) transportowanym powietrzem pierwotnym ze sprężarki (12). Średnica wewnętrzna przewodu, przez który podawano mieszanę pyłowo – powietrzną wynosiła  $d_w = 8 \text{ mm}$ . Wydajność podajnika węgla wynosiła  $0,25 \div 2,5 \text{ kg/h}$  i była zmieniana napięciem zasilania silnika elektrycznego (5). Powietrze wtórne, celem wywołania zawirowania, podawano do komory spalania stycznie dwoma przewodami o średnicy wewnętrznej  $d_w = 8 \text{ mm}$  rozmieszczonymi symetrycznie przy tylnej ścianie

komory cyklonowej (2). Dla pokonania oporów i zapewnienia odpowiednich strumieni przepływu, powietrze pierwotne i wtórne podawano ze sprężarki (12) przez stabilizatory ciśnienia (11) i rotametry. Do zapłonu mieszanki pyłowo – powietrznej wykorzystano plazmę termiczną wytwarzaną w plazmotronie (1) i wprowadzaną do komory spalania (2) od góry, prostopadłe do osi. Plazmotron zasilano energią elektryczną z zasilacza (9). Mierzono napięcie (7) i natężenie prądu łuku (8). Do inicjacji łuku służył układ zapłonowy (10). Gazem roboczym w plazmotronie był argon pobierany z butli wyposażonej w reduktor ciśnienia. Strumień objętości argonu ( $0,85 \text{ m}^3/\text{h}$ ) mierzono rotametrem. Plazmotron był chłodzony wodą z sieci. Do detekcji płomienia wykorzystano układ optyczny (3) (fotodiode krzemową z kwarcowym światłowodem) sprzężony elektrycznie z komputerem *PC*. Temperaturę płomienia pyłowego mierzono płaszczową termoparą *NiCr-Ni* połączoną z miernikiem (9) i komputerem *PC*. Spaliny odprowadzano układem wyciągowym przez separator cyklonowy (13), w którym zbierano cząstki popiołu i koksu. Wstępna komora spalania z plazmotronem nazywana jest dalej plazmowym palnikiem pyłowym (*PPP*).

Do komory spalania doprowadzano: mieszankę pyłowo – powietrzną, powietrze wtórne i plazmę argonową. Strumienie objętości czynników (pył, powietrze i argon) mierzono rotametrami. Moc plazmy określano mierząc napięcie i prąd łuku. Warunki zasilania *PPP* podano w tabeli 6.4.

Tabela 6.4

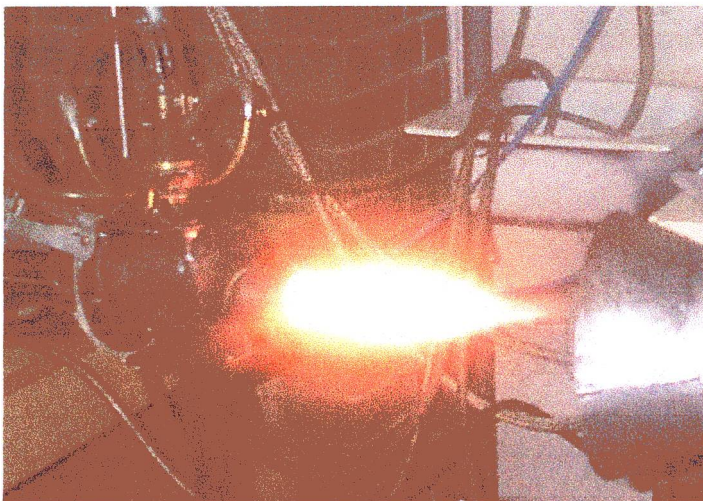
Warunki zasilania plazmowego palnika pyłowego

| Parametr                                   | Oznaczenie   | Jednostka             | Zakres          |
|--------------------------------------------|--------------|-----------------------|-----------------|
| Moc elektryczna plazmotronu                | $N_{el}$     | kW                    | $1,5 \div 3,0$  |
| Strumień objętości gazu roboczego (argonu) | $q_{vgr}$    | $\text{m}^3/\text{h}$ | 0,85            |
| Strumień masy paliwa                       | $q_{mw}$     | $\text{kg}/\text{h}$  | $0,25 \div 2,5$ |
| Strumień objętości powietrza pierwotnego   | $q_{vpowI}$  | $\text{m}^3/\text{h}$ | $0 \div 2,0$    |
| Strumień objętości powietrza wtórnego      | $q_{vpowII}$ | $\text{m}^3/\text{h}$ | $0 \div 20,0$   |

Plazma powodowała zapłon pyłu węglowego, który wydmuchiwany na zewnątrz palnika tworzył płomień pyłowy (Rys. 6.8). Moment zaniku płomienia określano za pomocą detektora optycznego sprzężonego z *PC*. Dla stałego strumienia masy pyłu zwiększano, a następnie zmniejszano strumień objętości powietrza tak, aby nastąpiło cofnięcie płomienia pyłowego do środka palnika. W efekcie otrzymano górną i dolną granicę występowania płomienia na wylocie z plazmowego palnika pyłowego. W taki sam sposób realizowano badania z użyciem palnika pyłowego typu strumieniowego.



Zmieniając odpowiednio strumień masy pyłu ( $q_{mw} = 0,25 \div 2,5 \text{ kg/h}$ ) i moc elektryczną plazmotronu ( $N_{el} = 1,5 \div 3,0 \text{ kW}$ ) otrzymano rodzinę krzywych przedstawiających wpływ mocy cieplnej palnika  $N_t$ , współczynnika nadmiaru powietrza, mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  oraz różnych właściwości fizykochemicznych paliw na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego (PPP).



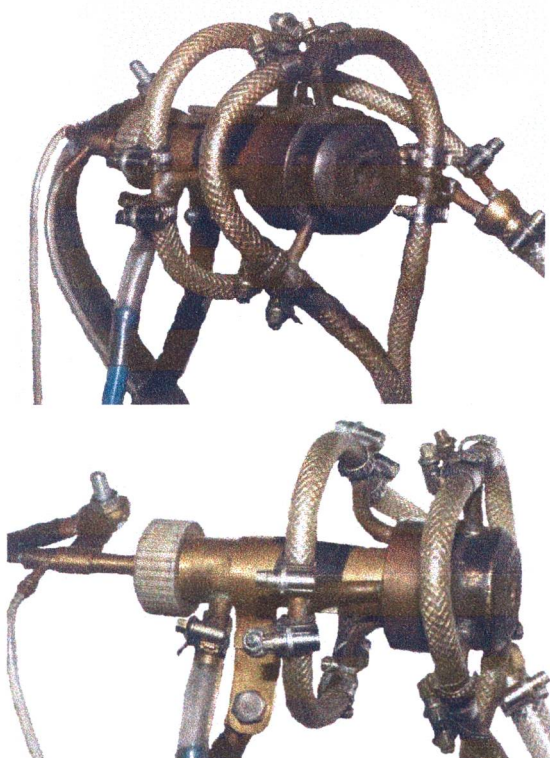
Rys. 6.8. Plazmowy palnik pyłowy podczas pracy

Współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$ , w zależności od przeprowadzanych badań, był obliczany na podstawie zmierzonej wartości udziału  $O_2$  w spalinach, lub obliczany na podstawie danych z analizy elementarnej paliwa oraz doprowadzanych strumieni przepływu paliwa stałego, powietrza pierwotnego i wtórnego do palnika.

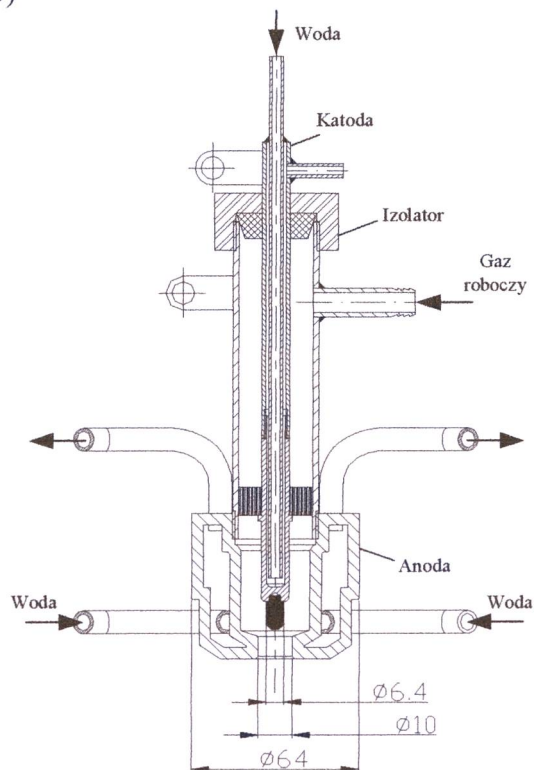
### 6.3. Plazmotrony użyte w badaniach

W badaniach nad stabilizacją płomienia pyłowego plazmą wykorzystano plazmotrony, wykonane według projektu autora pracy. Wykonano dwa plazmotrony z łukiem wewnętrznym: z liniowym i stycznym doprowadzeniem gazu roboczego. Zdjęcia plazmotronów oraz ich rysunki przekrojowe przedstawiono na rysunkach 6.9 i 6.10. Ze względu na duże obciążenie cieplne elektrody plazmotronów (anoda i katoda) były chłodzone wodą pobieraną z sieci. Chłodzone elementy katody obydwu plazmotronów zostały wykonane z mosiądzu, natomiast część robocza katody, na której występowało wyładowanie łukowe wykonano z wolframu torowanego ( $W + 2\%ThO_2$ ). Anody plazmotronów wykonano z mosiądzu, przy czym jej część robocza, ze względu na intensywną wymianę ciepła podczas wyładowania łukowego, została wykonana z miedzi. Gazem roboczym (plazmotwórczym) w przeprowadzonych badaniach był argon.

a)



b)



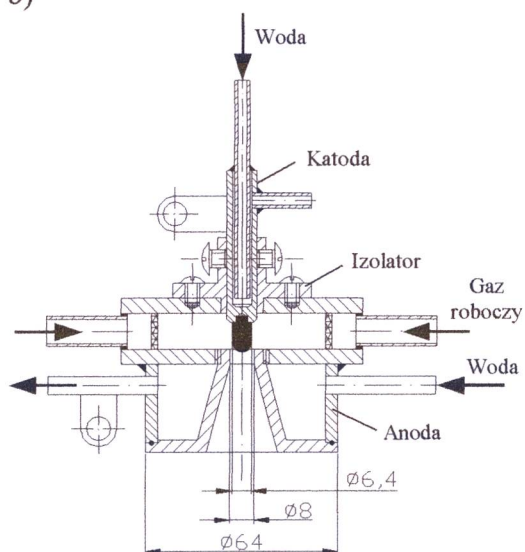
Rys. 6.9. Plazmotron z łukiem wewnętrznym i liniowym doprowadzeniem gazu roboczego: zdjęcie plazmotronu (a), schematyczny przekrój plazmotronu (b)

W celu wydłużenia czasu pracy katody, wykonano plazmotron ze stycznym doprowadzeniem gazu roboczego (Rys. 6.10), wywołującego rotację płamki katodowej podczas palenia się łuku, co zapewniało bardziej równomierne zużycie części roboczej katody.

a)



b)



Rys. 6.10. Plazmotron z łukiem wewnętrznym i stycznym doprowadzeniem gazu roboczego: zdjęcie plazmotronu (a), schematyczny przekrój plazmotronu (b)



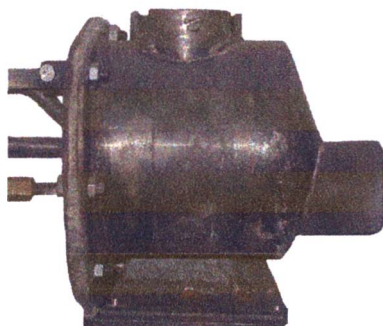
W badaniach użyto przede wszystkim plazmotronu z liniowym doprowadzeniem gazu roboczego. Plazmotron ze stycznym doprowadzeniem argonu użyto tylko dla porównania – stwierdzono zbliżone działanie obu typów plazmotronów.

#### 6.4. Palniki pyłowe użyte w badaniach

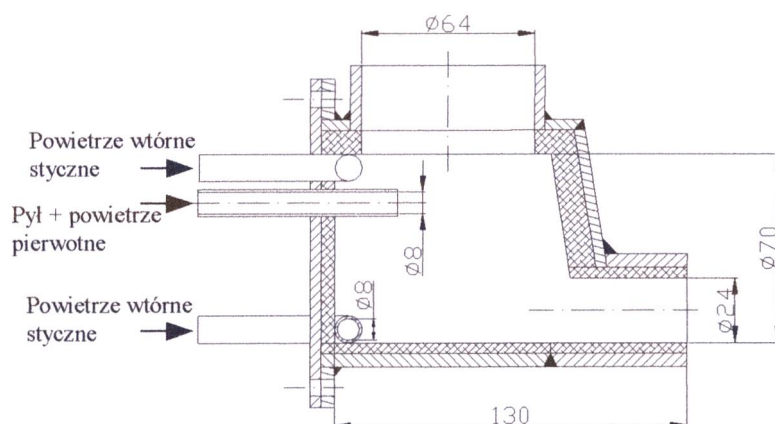
Badaniami objęto, wykonane według projektu autora pracy, dwa typy palników pyłowych: cyklonowy i strumieniowy. Obydwa palniki pyłowe wykonano z rur stalowych, które od wewnątrz zostały wyłożone ceramiczną izolacją. Zdjęcia palników pyłowych oraz ich rysunki przekrojowe przedstawiono na rysunkach 6.11 i 6.12.

W palniku pyłowym typu cyklonowego mieszankę pyłowo – powietrzną podawano prostopadle do kierunku wypływu plazmy, natomiast powietrze wtórne do spalania, w celu wywołania silnego zawirowania w komorze, zostało doprowadzone stycznie dwoma przewodami o średnicy wewnętrznej  $d_w = 8$  mm.

a)



b)

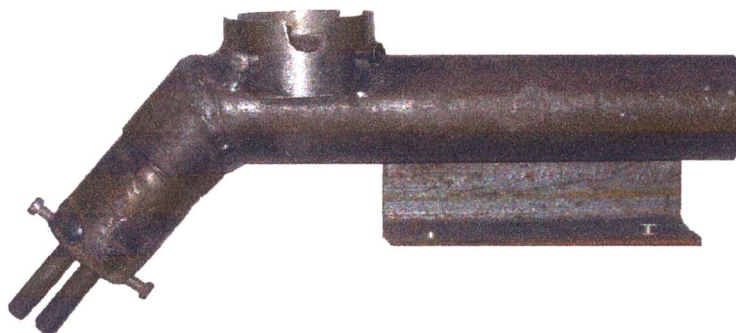


Rys. 6.11. Palnik pyłowy typu cyklonowego:  
zdjęcie palnika (a), schematyczny przekrój palnika (b)

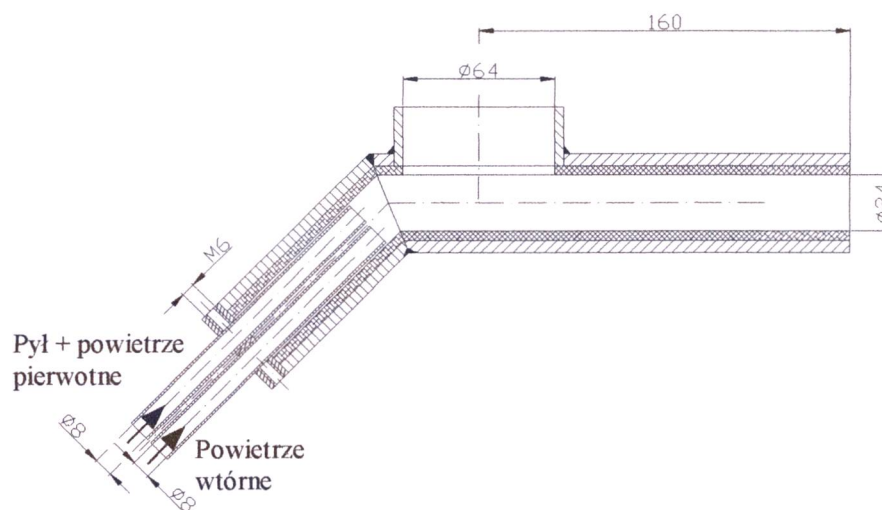


W palniku pyłowym typu strumieniowego mieszanekę pyłowo – powietrzna oraz powietrze wtórne doprowadzano równoległe do osi palnika pyłowego przewodami o średnicy wewnętrznej  $d_w = 8$  mm.

a)



b)

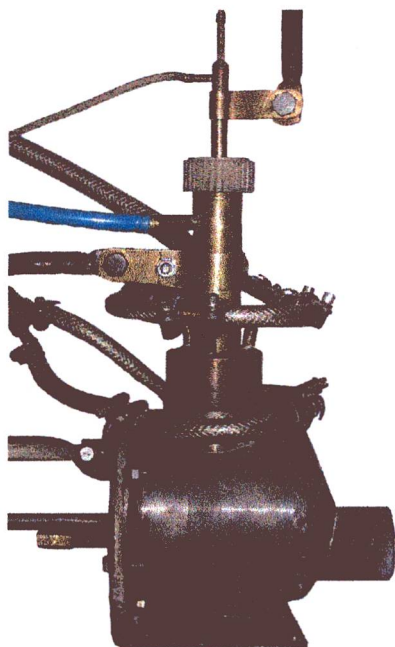


Rys. 6.12. Palnik pyłowy typu strumieniowego:  
zdjęcie palnika (a), schematyczny przekrój palnika (b)

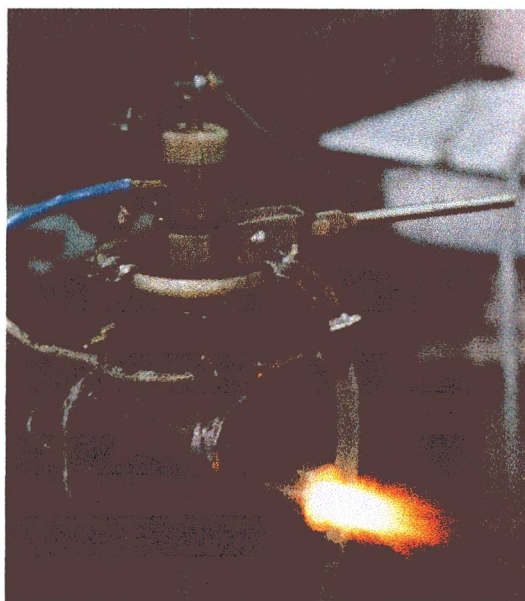
## 6.5. Plazmowe palniki pyłowe użyte w badaniach

Badania nad stabilizacją płomienia pyłowego plazmą wykonano z użyciem dwóch plazmowych palników pyłowych: typu cyklonowego i strumieniowego. Plazmowy palnik pyłowy (*PPP*), to palnik pyłowy z zainstalowanym na nim plazmotronem służącym do zapłonu i stabilizacji spalania paliw pyłowych. Zdjęcia plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego i strumieniowego w stanie wyłączonym oraz podczas pracy przedstawiono na rysunkach 6.13 i 6.14.

a)

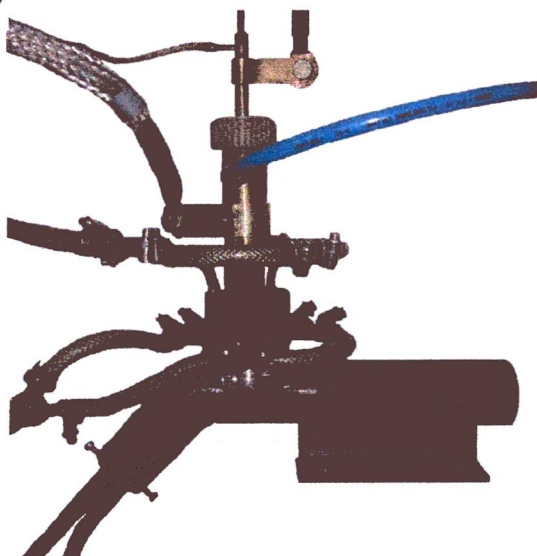


b)

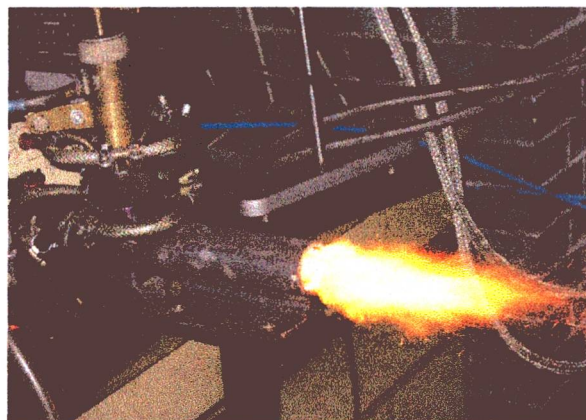


Rys. 6.13. Zdjęcie plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego:  
w stanie wyłączonym (a), podczas pracy (b)

a)



b)

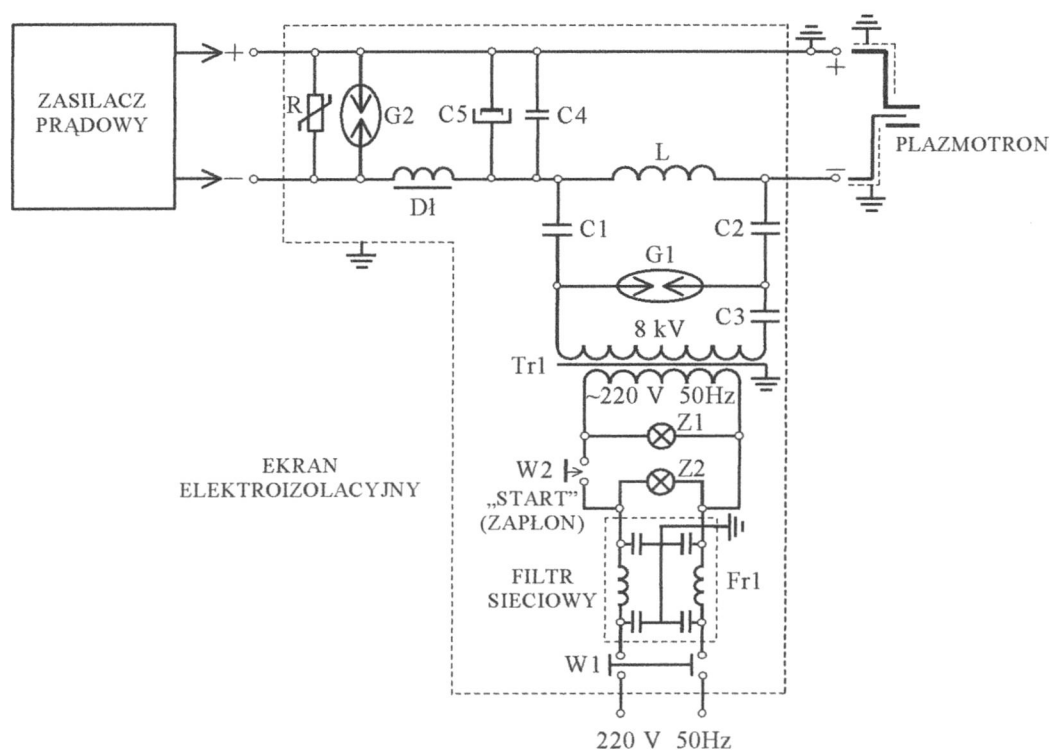


Rys. 6.14. Zdjęcie plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego:  
w stanie wyłączonym (a), podczas pracy (b)

## 6.6. Instalacja elektryczna plazmotronu

Niezbędnym elementem stanowiska badawczego jest instalacja elektryczna plazmotronu, służąca do „zapalenia” i podtrzymania łuku elektrycznego w plazmotronie. Do „zapalenia” łuku między katodą a anodą w plazmotronie służył iskrownik, który generował wysokie napięcie potrzebne do przebicia iskry w przestrzeni międzyelektrodowej. Chwilowe doprowadzenie wysokiego napięcia (około 50 kV) do

plazmotronu miało charakter impulsów prądów wysokiej częstotliwości ( $1 \div 2$  MHz). Schemat elektryczny układu zapłonowego przedstawiono na rysunku 6.15.



Rys. 6.15. Schemat elektryczny układu zapłonowego plazmotronu

Układ zapłonowo – zasilający działał w ten sposób, że wysokie napięcie wysokiej częstotliwości generowane było na indukcyjności  $L$  stanowiącej część obwodu rezonansowego wraz z pojemnościami  $C1$  i  $C2$ . Rezonans w obwodzie  $L$ ,  $C1$ ,  $C2$  pobudzany był udarowo przez zasilacz z równoległego obwodu transformatora  $WN Tr1$ , przez pojemność  $C3$ , prądem o częstotliwości 50 Hz i napięciem 8 kV. Prąd zmienny z transformatora  $Tr1$ , przez pojemność  $C3$ , przepływał przez  $L$ ,  $C1$ ,  $C2$ . Osiągające wartości maksymalne sinusoidy 50 Hz powodowały wyładowanie iskrowe przez iskierniki (odgromniki)  $G1$ . Obwód rezonansowy  $L$ ,  $C1$ ,  $C2$  przez małą rezystancję iskiernika  $G1$  był pobudzany do gasnących drgań własnych. Szybkie zmiany prądu w cewce  $L$  indukowały podwyższone napięcie zgodnie z  $e = -L d\phi/dt$ . Napięcie to włączone szeregowo z zasilaczem niskiego napięcia o dużej wydajności prądu było doprowadzane do elektrod plazmotronu. Przebieg napięcia inicjującego miał charakter gasnących impulsów o częstotliwości około 2 MHz, powtarzających się z częstotliwością 100 Hz. Cewka  $L$  (wykonana z przewodnika o znacznej powierzchni przekroju i znacznej liczbie zwojów) musi spełniać dwa skrajne wymagania. W momencie inicjacji plazmotronu wytwarzała napięcie rzędu 100 kV przy względnie małym prądzie wyładowania, po zapłonie natomiast

musiała zapewnić wyładowanie niskiego napięcia (około 20 V) o dużym prądzie (rzędu 150 A). Kondensatory  $C4$  i  $C5$  zamykały prądy  $WN$  i wysokiej częstotliwości w obwodzie plazmotronu oraz indukcyjności  $L$  separując wyładowanie inicjujące od zasilacza niskonapięciowego. Dodatkowo dławik  $D1$  wraz z odgromnikiem niskonapięciowym  $G2$  i warystorem  $R$  zabezpieczał wyjście zasilacza od przepięć z obwodu inicjującego. Filtr sieciowy  $Fr1$  zabezpieczał z kolei sieć zasilającą od przenikania zakłóceń generowanych przez układ w momencie zapłonu. Dodatkowo ekranowanie przewodów doprowadzających energię do plazmotronu i całego układu ograniczało promieniowanie zakłóceń elektromagnetycznych na zewnątrz.

## **6.7. Aparatura pomiarowa**

### **6.7.1. Aparatura pomiarowa użyta do badań wpływu wyładowań koronowych na zapłon pyłu węglowego**

W badaniach nad wpływem wyładowań koronowych na temperaturę zapłonu pyłu węglowego wykorzystano następujące przyrządy kontrolne i aparaturę pomiarową:

- pomiar temperatury zapłonu pyłu węglowego w aparacie *Godberta – Greenwalda*: termopara *Ni-CrNi* o zakresie  $0 \div 1200$  °C i średnicy 3 mm; dokładność 0,5%,
- pomiar ciśnienia podmuchowego do aparatu *Godberta – Greenwalda*: manometr laboratoryjny o zakresie  $0 \div 1,6$  bar; dokładność 0,05 bar,
- pomiar napięcia wyładowania: woltomierz elektrostatyczny o zakresie  $0 \div 15$  kV; dokładność 1%,

### **6.7.2. Aparatura pomiarowa użyta do badań wpływu mocy elektrycznej plazmotronu $N_{el}$ na charakterystyki plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego i strumieniowego**

Podczas realizacji badań nad stabilizacją płomienia pyłowego plazmą wykorzystano następujące przyrządy kontrolne i aparaturę pomiarową:

- pomiar strumienia objętości powietrza pierwotnego: rotametr laboratoryjny o zakresie  $200 \div 2000$  dm<sup>3</sup>/h ( $0,0556 \div 0,5556$  dm<sup>3</sup>/s); dokładność 10 dm<sup>3</sup>/h ( $0,00278$  dm<sup>3</sup>/s),

- pomiar strumienia objętości powietrza wtórnego: rotametr laboratoryjny o zakresie  $200 \div 2000 \text{ dm}^3/\text{h}$  ( $0,0556 \div 0,5556 \text{ dm}^3/\text{s}$ ); dokładność  $10 \text{ dm}^3/\text{h}$  ( $0,00278 \text{ dm}^3/\text{s}$ ),
- pomiar strumienia objętości powietrza wtórnego: rotametr laboratoryjny o zakresie  $2,0 \div 20,0 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0,000556 \div 0,00556 \text{ m}^3/\text{s}$ ); dokładność  $0,25 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0,0000694 \text{ m}^3/\text{s}$ ),
- pomiar strumienia objętości argonu: rotametr laboratoryjny o zakresie  $200 \div 2000 \text{ dm}^3/\text{h}$  ( $0,0556 \div 0,5556 \text{ dm}^3/\text{s}$ ); dokładność  $10 \text{ dm}^3/\text{h}$  ( $0,00278 \text{ dm}^3/\text{s}$ ),
- pomiar temperatury płomienia na wylocie z plazmowego palnika pyłowego: termopara *Ni-CrNi* o zakresie  $0 \div 1200 \text{ }^\circ\text{C}$  i średnicy 3 mm; dokładność 0,5%,
- pomiar temperatury sondowanego płomienia w danym punkcie: termopara *PtRh10%-Pt* o zakresie  $0 \div 1600 \text{ }^\circ\text{C}$  i średnicy 0,3 mm; dokładność 0,5%,
- pomiar strumienia masy paliwa: podajnik o zakresie  $0,15 \div 3,50 \text{ kg/h}$  ( $0,0000416 \div 0,000972 \text{ kg/s}$ ); dokładność  $0,02 \text{ kg/h}$  ( $0,00000277 \text{ kg/s}$ ),
- pomiar położenia termopary w badanym płomieniu zamocowanej na suporcie: regulowany suport w dwóch płaszczyznach o zakresie  $0 \div 40 \text{ cm}$  ( $0 \div 0,4 \text{ m}$ ); dokładność 1 mm ( $0,001 \text{ m}$ ),
- pomiar napięcia łuku: woltomierz o zakresie  $0 \div 90 \text{ V}$ ; dokładność 1,5%,
- pomiar natężenia prądu łuku: amperomierz o zakresie  $0 \div 400 \text{ A}$ ; dokładność 1,5%,
- pomiar stężeń  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$  w spalinach analizatorem spalin typu *GA-40* firmy *Eljack Electronic*; dokładność pomiaru, podana przez producenta, wynosi 5% [78],
- pomiar stężenia  $\text{CO}$  w spalinach analizatorem typu *Infralyt 1206* o zakresie pomiarowym  $0 \div 20\%$ ; dokładność 0,1%,
- pomiar stężenia  $\text{CO}_2$  w spalinach analizatorem typu *Infralyt 1206* o zakresie pomiarowym  $0 \div 24\%$ ; dokładność 0,1%.



## 7. Wpływ wyładowań koronowych na zapłon pyłu węglowego

Celem tej części pracy było zbadanie wpływu wyładowań elektrycznych typu koronowego na minimalną temperaturę zapłonu mieszanki pyłowo – powietrznej dla wybranych typów węgla. Charakterystyka użytych węgla została przedstawiona w tabeli 6.1.

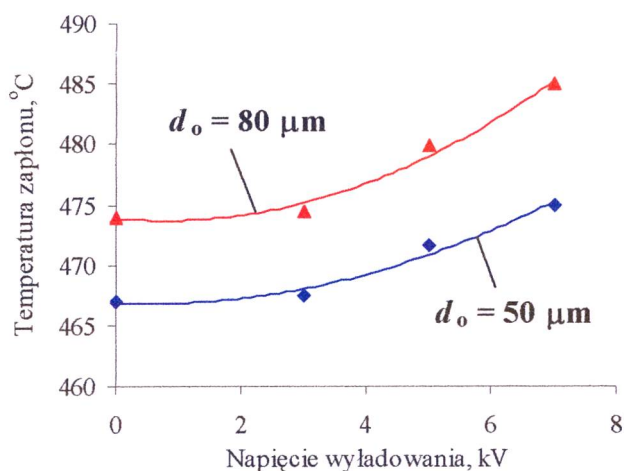
Problem ten jest istotny dla zrozumienia mechanizmu zapłonu pyłu węglowego plazmą. Obok bowiem oddziaływania termicznego plazmy występuje także wpływ generowanych w wyładowaniach elektrycznych jonów oraz powstającego ozonu według reakcji [79]:



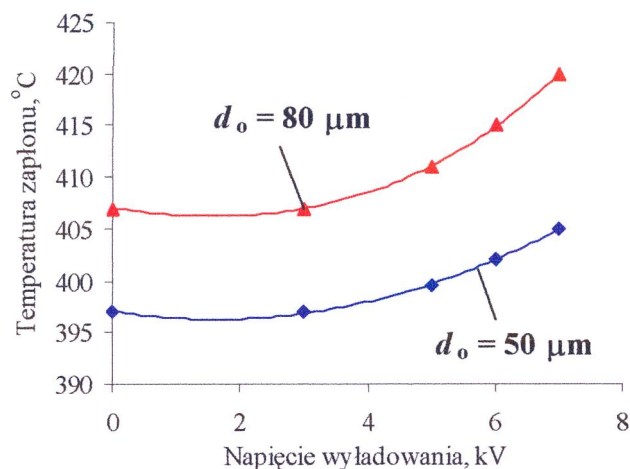
Źródłem tlenu atomowego jest dysocjacja cząsteczek  $O_2$  w plazmie. Zastosowanie wyładowań koronowych w badaniach warunków zapłonu pyłu węglowego będzie rozstrzygające, ponieważ towarzyszący tym wyładowaniom efekt termiczny jest pomijalnie mały w stosunku do strumienia ciepła przejmowanego przez pył węglowy w aparacie *Godberta – Greenwalda*.

### 7.1. Wyniki pomiarów

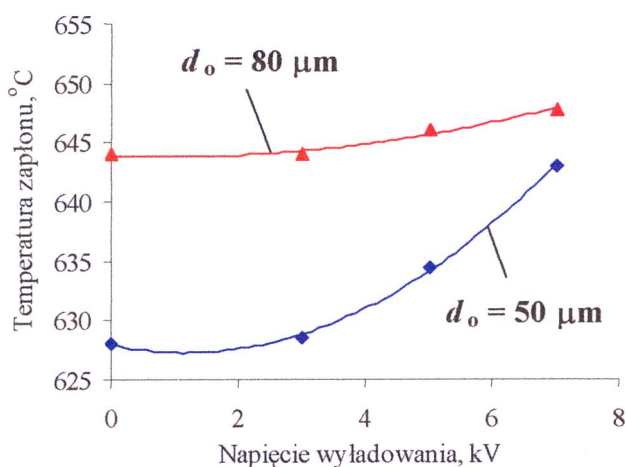
Wyniki przeprowadzonych badań, zestawione odpowiednio dla każdego typu i frakcji węgla, przedstawiono w postaci wykresów na rysunkach 7.1 ÷ 7.6. Obrazują one zależność minimalnej temperatury zapłonu pyłu węglowego od napięcia wyładowania koronowego, dla polaryzacji dodatniej (Rys. 7.1 ÷ 7.3) oraz ujemnej (Rys. 7.4 ÷ 7.6) elektrody centralnej [80].



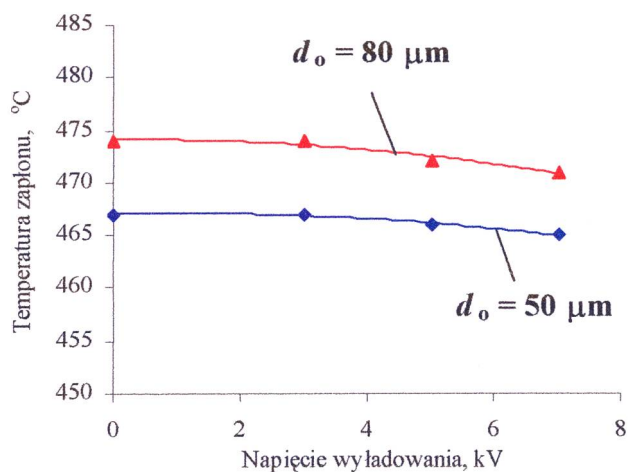
Rys. 7.1. Wpływ napięcia wyładowania koronowego na temperaturę zapłonu pyłu węglowego przy polaryzacji dodatniej (węgiel brunatny – KWB Turów)



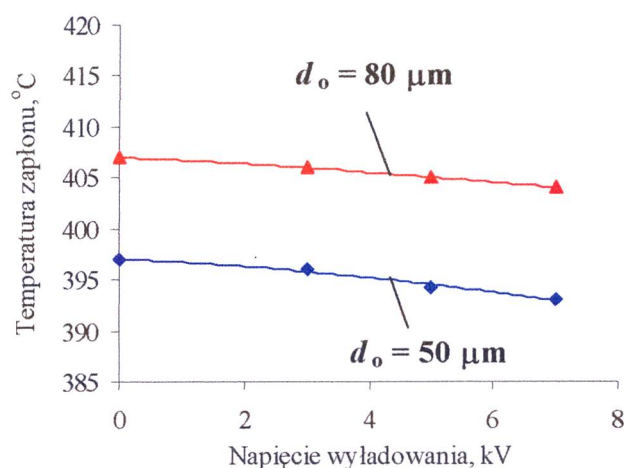
Rys. 7.2. Wpływ napięcia wyładowania koronowego na temperaturę zapłonu pyłu węglowego przy polaryzacji dodatniej (węgiel brunatny – KWB Adamów)



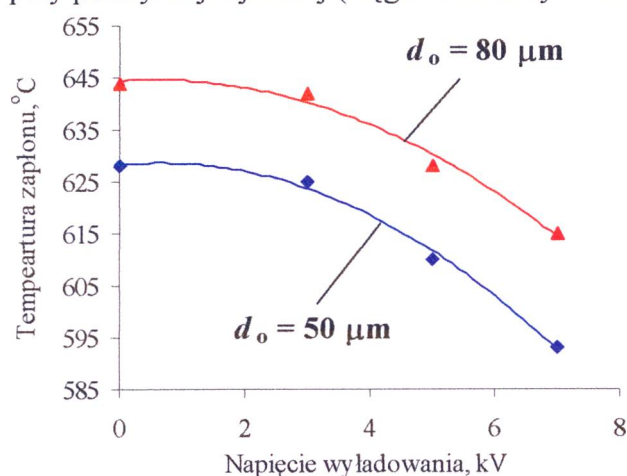
Rys. 7.3. Wpływ napięcia wyładowania koronowego na temperaturę zapłonu pyłu węglowego przy polaryzacji dodatniej (węgiel kamienny – pobraný z EC Czechnica)



Rys. 7.4. Wpływ napięcia wyładowania koronowego na temperaturę zapłonu pyłu węglowego przy polaryzacji ujemnej (węgiel brunatny – KWB Turów)



Rys. 7.5. Wpływ napięcia wyładowania koronowego na temperaturę zapłonu pyłu węglowego przy polaryzacji ujemnej (węgiel brunatny – KWB Adamów)



Rys. 7.6. Wpływ napięcia wyładowania koronowego na temperaturę zapłonu pyłu węglowego przy polaryzacji ujemnej (węgiel kamienny – pobrany z EC Czechnica)

## 7.2. Dyskusja

Wyniki pomiarów zostały zinterpretowane w oparciu o analizę wpływu pola elektrycznego i ozonu na przebieg zjawiska oraz zmianę temperatury zapłonu pyłu węglowego.

### 7.2.1. Wpływ pola elektrycznego

W technice odpylania gazów wiadomo, że cząstki popiołu i węgla ładują się ujemnie w polu elektrycznym, co zostało wykorzystane w konstrukcji elektrofiltrów [81, 82]. Ten efekt może być także wykorzystany do interpretacji otrzymanych wyników pomiarów.

Temperatura zapłonu pyłu węglowego w aparacie *Godberta – Greenwalda* jest najniższą temperaturą komory zapłonowej, przy której obserwuje się świetlny efekt

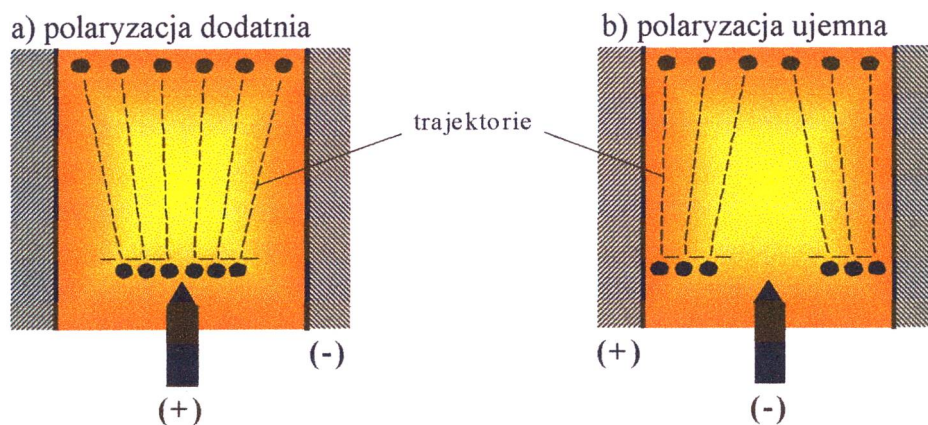


zapłonu. Ze względu na fakt, że temperatura zapłonu pyłu maleje z czasem przebywania pyłu w aparacie zapłonowym [83], należy uważać, że zapłon następuje w dolnej części komory zapłonowej – w pobliżu elektrod.

Drugi czynnik, który należy wziąć pod uwagę podczas analizy wyników pomiarów, to fakt, że maksymalna temperatura w komorze zapłonowej aparatu *Godberta* – *Greenwalda* występuje przy ścianie cylindra. Dodatkowo trzeba uwzględnić, że temperatura zapłonu pyłu maleje, kiedy zwiększa się jego koncentracja [83].

Biorąc pod uwagę wymienione czynniki można podać następującą interpretację zmian temperatury zapłonu pyłu węglowego ze zmianą polaryzacji elektrody umieszczonej osiowo w komorze zapłonowej aparatu *Godberta* – *Greenwalda*:

- a) wdmuchiwanie do komory zapłonowej cząstki pyłu ładowały się ujemnie,
- b) oddziaływanie dodatnio spolaryzowanej elektrody przyspieszało przesuwanie się ujemnie naładowanych cząstek pyłu węglowego w dół komory, powodując skrócenie czasu przebywania,
- c) pole elektryczne wywołane dodatnią polaryzacją elektrody w osi aparatu kierowało cząstki węgla ku osi cylindra (Rys. 7.7a),
- d) następowało zmniejszenie koncentracji pyłu przy ścianie cylindra oraz jej wzrost w osi komory zapłonowej,
- e) zmniejszenie koncentracji pyłu przy gorącej ścianie cylindra powodowało wzrost temperatury zapłonu pyłu (Rys. 7.1 ÷ 7.3),
- f) zmiana polaryzacji napięcia z dodatniej na ujemną spowodowała odwrotne efekty i zachowanie się pyłu węglowego w komorze zapłonowej (Rys. 7.7b). W efekcie obserwowano obniżenie temperatury zapłonu pyłu ze zwiększaniem napięcia wyładowania w komorze zapłonowej (Rys. 7.4 ÷ 7.6).



Rys. 7.7. Zmiana koncentracji pyłu w komorze zapłonowej w wyniku oddziaływania pola elektrycznego

### 7.2.2. Wpływ ozonu

Wyładowaniom elektrycznym towarzyszy powstawanie ozonu  $O_3$  w powietrzu [18]. W komorze zapłonowej ozon generowany był u dołu komory, w pobliżu elektrod. Na skutek występującej w komorze zapłonowej konwekcji swobodnej był on jednak unoszony ku górze. Ozon jest bardzo reaktywny chemicznie, dlatego zarówno cząsteczki  $O_3$ , jak i produkt jego rozkładu (atomy  $O$ ) bezpośrednio „atakują” paliwo (przede wszystkim węglowodory i tlenek węgla). Jednak wydaje się, że „czas życia” ozonu w wysokiej temperaturze komory zapłonowej był za krótki na efektywne oddziaływanie na pył węglowy.

Sprawdzeniem roli ozonu w zapłonie pyłu węglowego powinny być różnice w kinetyce zapłonu w zależności od rodzaju węgla. Porównanie zmian temperatury zapłonu ze wzrostem napięcia między elektrodami dla użytych w badaniach węgli nie wykazało jednak istotnych różnic.

Dodatkowe wytłumaczenie braku wpływu ozonu na parametry zapłonu pyłu węglowego opiera się na mechanizmie zapłonu paliw stałych. Zasadnicze znaczenie ma rozkład termiczny węgla i wydzielanie części lotnych, co zależy od takich czynników jak szybkość nagrzewania się cząstek węgla (rozmiar cząstek, różnica temperatur) i struktura chemiczna węgla [27].

### 7.3. Podsumowanie

Rozpatrując wpływ wyładowań elektrycznych na zapłon pyłu węglowego w aparacie *Godberta – Greenwalda* warto oddzielić aspekty chemiczne i fizyczne tych oddziaływań. Do pierwszych należy generacja nierównowagowego rozkładu rodników przez wyładowanie elektryczne i pojawienie się w powietrzu ozonu.

Do istotnych czynników fizycznych należy zaliczyć oddziaływanie pola elektrycznego na poruszające się cząstki węgla w komorze zapłonowej. Ciepły wpływ wyładowań elektrycznych na rozkład substancji organicznej węgla był marginalny, ponieważ moc wyładowania elektrycznego była niewielka (kilka mW). Cząstki węgla szybko nagrzewały się od gorącego powietrza i ulegały zapłonowi po przekroczeniu temperatury zapłonu.

Wyniki wykonanych badań doświadczalnych oraz przeprowadzona analiza wyników prowadzą do następujących wniosków dotyczących oddziaływania wyładowań elektrycznych na temperaturę zapłonu pyłu węglowego:

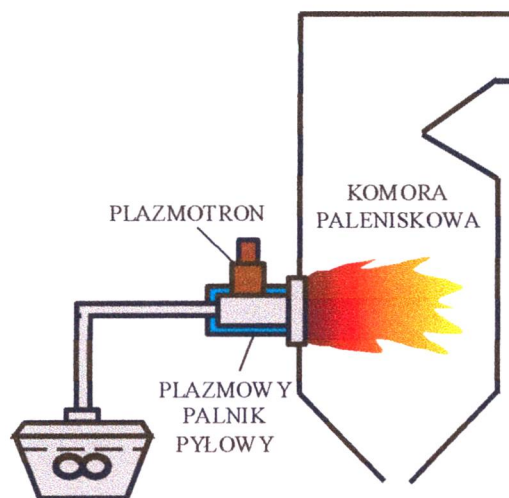


- a) oddziaływanie wyładowań ciemnych, jarzeniowych i koronowych na temperaturę zapłonu pyłu węglowego jest niewielkie (zmiana temperatury zapłonu około 1 ÷ 4%),
- b) niewielki wzrost temperatury zapłonu pyłu węglowego, kiedy dodatnia elektroda była umieszczona centralnie w komorze zapłonowej, oraz jej niewielki spadek w przypadku elektrody o polaryzacji ujemnej, należy tłumaczyć oddziaływaniem pola elektrycznego na cząstki pyłu,
- c) nie stwierdzono wpływu rodzaju węgla na zależność temperatury zapłonu pyłu węglowego od napięcia na elektrodzie, co należy tłumaczyć marginalnym wpływem ozonu na kinetykę chemiczną zapłonu cząstek węgla (w warunkach wykonanych badań).

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają tezę pracy, że na działanie plazmowego palnika pyłowego dominujący wpływ wywiera termiczne działanie strumienia plazmy, natomiast efekty chemiczne i elektryczne plazmy mają drugorzędne znaczenie.

## 8. Plazmowy zapłon i stabilizacja płomienia pyłowego

Idea działania plazmowego palnika pyłowego polega na wprowadzeniu strumienia plazmy termicznej do objętości, do której wpływa mieszanka pyłowo – powietrzna w celu zapoczątkowania rozkładu termicznego węgla i zapłonu. W rezultacie otrzymuje się stabilny płomień pyłowy wydmuchiwany powietrzem wtórnym do wnętrza komory paleniskowej kotła (Rys. 8.1).



Rys. 8.1. Idea działania plazmowego palnika pyłowego

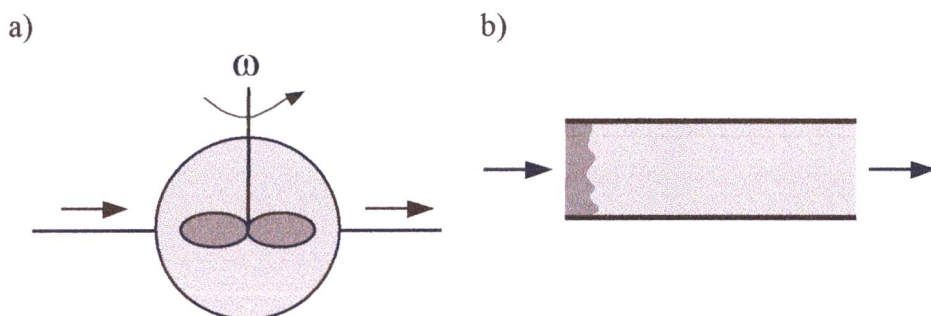
Plazmotron w palniku pyłowym jako ciągły generator strumienia ciepła w postaci plazmy pełni zatem rolę, nie tylko źródła zapłonu pyłu węglowego, ale również czynnika stabilizującego proces spalania mieszanki pyłowo – powietrznej. Na utrzymanie stabilnego płomienia pyłowego w danym zakresie pracy plazmowego palnika pyłowego ma wpływ wiele czynników, do których należą między innymi: warunki zasilania palnika w paliwo, moc elektryczna plazmotronu oraz właściwości fizykochemiczne mieszanki paliwowo – powietrznej.

Zasadniczym celem tej części pracy jest określenie zakresu stabilnej pracy plazmowego palnika pyłowego i interpretacja otrzymanych zależności. Do podstawowych czynników wpływających na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego, które badano, należy między innymi moc elektryczna plazmotronu  $N_{el}$  niezbędna do zapewnienia wymaganej mocy cieplnej plazmowego palnika pyłowego  $N_t$  oraz współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$ , używany standardowo w technice spalania do określania zakresu stabilności palników i komór spalania.

Do istotnych czynników wpływających na pracę plazmowego palnika pyłowego należy także organizacja procesu spalania pyłu węglowego, ponieważ dynamika spalania

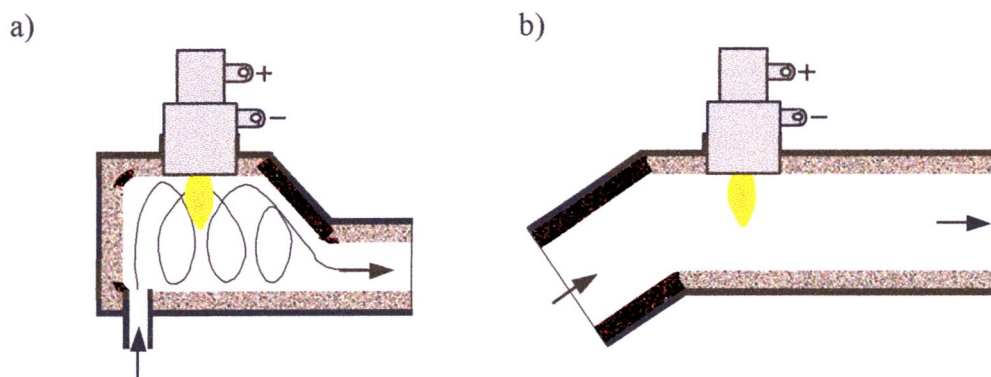
mieszanki pyłowo – powietrznej jest znacznie wolniejsza niż mieszanki gazowo – powietrznej.

W celu interpretacji otrzymanych wyników doświadczalnych nawiązywać się będzie do teorii reaktorów chemicznych, w której wyróżnia się dwa skrajne schematy reagowania w reaktorach przepływowych: z doskonałym wymieszaniem i przepływem tłokowym (Rys. 8.2) [84].



Rys. 8.2. Schematy przepływowych reaktorów chemicznych: z doskonałym wymieszaniem (a), z przepływem tłokowym (b)

W odniesieniu do konstrukcji badanych palników pyłowych (Rys. 8.3), palnik typu cyklonowego będzie kojarzony z reaktorem przepływowym z doskonałym wymieszaniem, natomiast palnik typu strumieniowego z reaktorem z przepływem tłokowym.

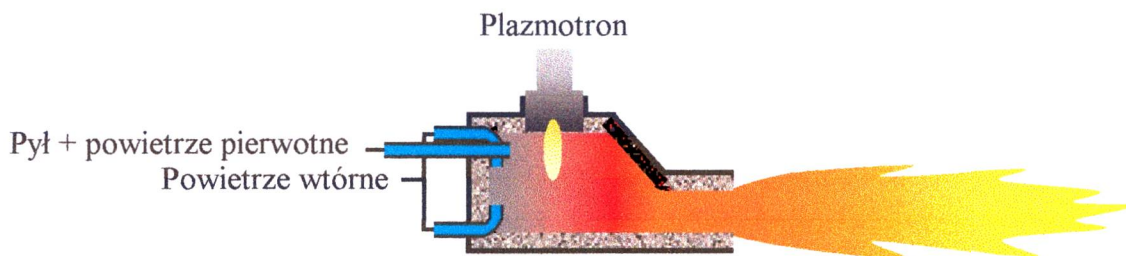


Rys. 8.3. Forma działania plazmowego palnika pyłowego: cyklonowego (a), strumieniowego (b)

## 8.1. Podstawowe charakterystyki pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego

Plazmowy palnik pyłowy typu cyklonowego, którego charakterystyki przedstawiono w tym punkcie, pokazano na rysunku 6.13, a jego schemat na rysunku 8.4. Intensywne mieszanie w palniku wywołano stycznym doprowadzeniem dwóch strumieni powietrza wtórnego. Strumień mieszanki pyłu węglowego i powietrza pierwotnego skierowano na strumień plazmy. Plazmotron umocowano pionowo na cylindrycznej ścianie palnika, żeby nie wywołać zwarcia elektrycznego pyłem węglowym.

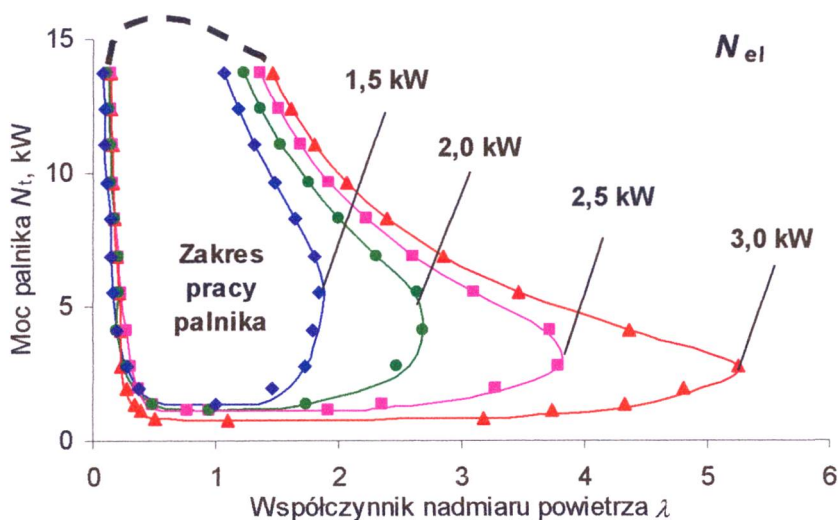




Rys. 8.4. Schemat plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego

Ze względu na niewielkie wymiary geometryczne laboratoryjnego palnika, średni czas przebywania w nim, dla zakresu strumieni przepływu czynników (Tab. 6.4), wynosił  $50 \text{ ms} < t_{\text{res}} < 800 \text{ ms}$ . Jest to czas niewystarczający do spalania pojedynczej cząstki węglowej, dlatego należy liczyć się, że w takim palniku będzie zachodzić przede wszystkim proces odgazowania i spalania części lotnych.

Charakterystykę plazmowego palnika pyłowego przedstawiono w typowym dla badań stabilności palników układzie współrzędnych: moc palnika – współczynnik nadmiaru powietrza. Charakterystyka „od góry” ograniczona była wydajnością podajnika pyłu węglowego. Na rysunku 8.5 przedstawiono wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{\text{el}}$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego.



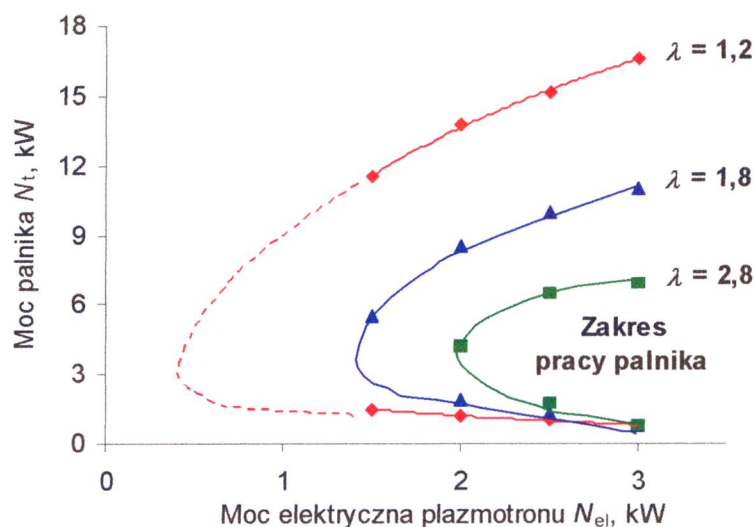
Rys. 8.5. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{\text{el}}$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (węgiel brunatny)

Wyniki pomiarów dowodzą, że moc elektryczna plazmotronu  $N_{\text{el}}$  ma znaczący wpływ na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego. Wraz ze wzrostem mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{\text{el}}$  obszar działania plazmowego palnika pyłowego zwiększa się, gdyż rośnie strumień ciepła doprowadzany do mieszanki pyłowo – powietrznej przez plazmę. Zakres pracy palnika wraz ze wzrostem  $N_{\text{el}}$  przesuwa się ku coraz uboższym



mieszanom pyłowo – powietrznym. Granica bogatej mieszanki  $\lambda_{\min}$  była zbliżona przy wszystkich stosowanych mocach plazmotronu.

Ważnym czynnikiem wpływającym na przebieg procesu spalania i stabilność płomienia pyłowego jest współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$ , który decyduje również o jakości spalania i ma wpływ na wymianę ciepła w komorze paleniskowej. Zależność zakresu pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego od współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda > 1$  przedstawiono na rysunku 8.6.



Rys. 8.6. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (węgiel brunatny)

Uzyskane wyniki pomiarów wskazują, że zwiększenie współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda > 1$  powoduje zmniejszenie zakresu pracy plazmowego palnika pyłowego. Wynik ten należy tłumaczyć obniżeniem temperatury płomienia pyłowego, a przede wszystkim skróceniem czasu przebywania  $t_{\text{res}}$  w komorze cyklonowej wraz ze zwiększaniem się strumienia objętości powietrza do palnika.

### 8.1.1. Analiza stabilności plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego

Ważną cechą każdego palnika jest zakres jego stabilnej pracy. W praktyce zakres pracy palników określa się doświadczalnie, ponieważ brakuje jeszcze odpowiednich narzędzi matematycznych dla teoretycznej analizy stabilności płomieni pyłowych. Jednak analiza stabilności spalania ma istotne znaczenie dla zrozumienia wpływu ważniejszych czynników na gaśnięcie płomienia i pozwala stworzyć kryteria przydatne dla doświadczalnego określenia zakresu stabilności.

Charakter działania plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego pozwala odwołać się do pojęć z teorii przepływowych reaktorów chemicznych. Podstawowe znaczenie odgrywają w niej dwa czynniki: charakterystyczny czas reakcji chemicznej  $t_{ch}$  i średni czas przebywania reagentów w reaktorze  $t_{res}$ , gdzie  $t_{ch}$  definiuje się wzorem:

$$t_{ch} = \frac{1}{k} \quad (8.1)$$

w którym  $k$  jest stałą szybkości reakcji i ma wymiar  $s^{-1}$  dla reakcji chemicznych pierwszego rzędu. Średni czas przebywania  $t_{res}$  można w przybliżeniu wyznaczyć ze wzoru:

$$t_{res} = \frac{V}{q_v} \quad (8.2)$$

Podstawowe kryterium podobieństwa w tym przypadku to pierwsza liczba *Damkoehlera*:

$$Da = \frac{t_{res}}{t_{ch}} \quad (8.3)$$

Liczba kryterialna  $Da$  jest szeroko wykorzystywana w teorii spalania, na przykład dla określenia zakresu stabilności spalania za ciałem nieopływowym [4, 85]. Strefa recyrkulacji jest wówczas traktowana jako reaktor doskonałego wymieszania z czasem przebywania określonym następująco:

$$t_{res} \sim \frac{d}{w} \quad (8.4)$$

gdzie  $w$  i  $d$  oznaczają odpowiednio prędkość przepływu i rozmiar geometryczny ciała nieopływowego.

Biorąc pod uwagę, że charakterystyczny czas reakcji chemicznej drugiego rzędu jest odwrotnie proporcjonalny do ciśnienia:

$$t_{ch} \sim \frac{1}{p} \quad (8.5)$$

otrzymuje się znane kryterium stabilności dla komór spalania turbin gazowych i silników odrzutowych w postaci [85]:

$$\tilde{Da} = \frac{w}{pd}, \quad (8.6)$$

gdzie  $\tilde{Da}$  jest analogiem liczby *Damkoehlera*, niestety w postaci wymiarowej.

Bezpośrednie zastosowanie tego kryterium do palnika pyłowego nie jest możliwe i w celu określenia analogicznego kryterium należy skorzystać z ogólnej zależności (8.3).

W przypadku spalania pyłu węglowego całkowity czas spalania zależy od szybkości nagrzewania cząstek węglowych, szybkości wydzielania i spalania części lotnych oraz szybkości spalania pozostałości koksowej. Można przyjąć, że spalanie pozostałości koksowej podczas początkowego stadium spalania (wybuchu, zapłonu) jest marginalne, kinetyka spalania części lotnych jest bowiem znacznie szybsza od kinetyki spalania pozostałości koksowej i nagrzewu cząstek. Wydzielanie części lotnych i ich spalanie jest natomiast kontrolowane przez proces nagrzewu cząstki węglowej [53]. Zatem, rozważając mechanizm zapłonu pyłu węglowego należy przede wszystkim rozpatrzyć, zamiast ogólnego czasu reakcji chemicznej spalania, proces indukcji zapłonu cząstki węglowej [86]. Czas indukcji zapłonu  $t_{ind}$  uzależniony jest przede wszystkim od czasu osiągnięcia przez cząstkę węglową temperatury zapłonu, która zależy od wielu czynników (charakteru zapłonu, właściwości węgla, rozmiaru cząstki) [87]. Do momentu osiągnięcia temperatury zapłonu cząstka węgla praktycznie nagrzewa się „inertnie”, zatem występującą w niej zmianę temperatury  $T$  można z dobrym przybliżeniem opisać równaniem:

$$c_p m_w \frac{dT}{dt} = -\alpha F_w (T - T_{ot}) \quad (8.7)$$

Całkując powyższe równanie dla stałej temperatury otoczenia gazowego cząstki ( $T_{ot}$ ) łatwo wykazać, że czas osiągnięcia temperatury zapłonu  $T_z$  ( $T_z < T_{ot}$ ) jest proporcjonalny do rozmiaru cząstki węglowej  $d_o$ :

$$t_{ind} \sim d_o \quad (8.8)$$

Średni czas przebywania  $t_{res}$  w palniku cyklonowym można natomiast określić następująco:

$$t_{res} = \frac{D}{w} \quad (8.9)$$

gdzie  $D$  jest średnicą wewnętrzną palnika, a  $w$  jest średnią prędkością przepływu reagentów przez palnik.

W celu nawiązania do wyników pomiarów, w których posługiwano się współczynnikiem nadmiaru powietrza  $\lambda$ , w przypadku stałego strumienia masy pyłu można wykorzystać relację:

$$t_{res} = \frac{D}{w} \sim \frac{1}{\lambda} \quad (8.10)$$

W rezultacie kryterium (8.3) przyjmuje postać:

$$\tilde{Da} = \frac{t_{res}}{t_{ch}} = \frac{1}{d_o \lambda} = const, \quad (8.11)$$

gdzie  $d_o$  jest rozmiarem cząstki węglowej, a  $\tilde{Da}$  jest analogiem liczby *Damkoehlera*.

Otrzymane kryterium stabilności spalania nie jest niestety bezwymiarowe, ale także kryterium stabilności spalania w turbinach gazowych (8.6) jest wymiarowe, ponieważ wynika z praktyki inżynierskiej, w której bierze się pod uwagę przede wszystkim parametry łatwo mierzalne. Konstruując kryterium stabilności dla palnika pyłowego kierowano się znaczeniem współczynnika nadmiaru powietrza w technice spalania oraz zamierzano zwrócić uwagę na znaczenie rozdrobnienia pyłu węglowego dla stabilności płomienia pyłowego za palnikiem pyłowym.

W celu sprawdzenia poprawności przedstawionych rozważań wzięto pod uwagę wyniki pomiarów z p. 9.3.4 przedstawiające wpływ rozdrobnienia paliwa stałego na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego. Wybrane do obliczeń parametry z tych badań ( $d_{sr}$ ,  $\lambda_{max}$ ) zawarto w tabeli 8.1, a otrzymane wyniki przedstawiono graficznie na rysunku 8.7.

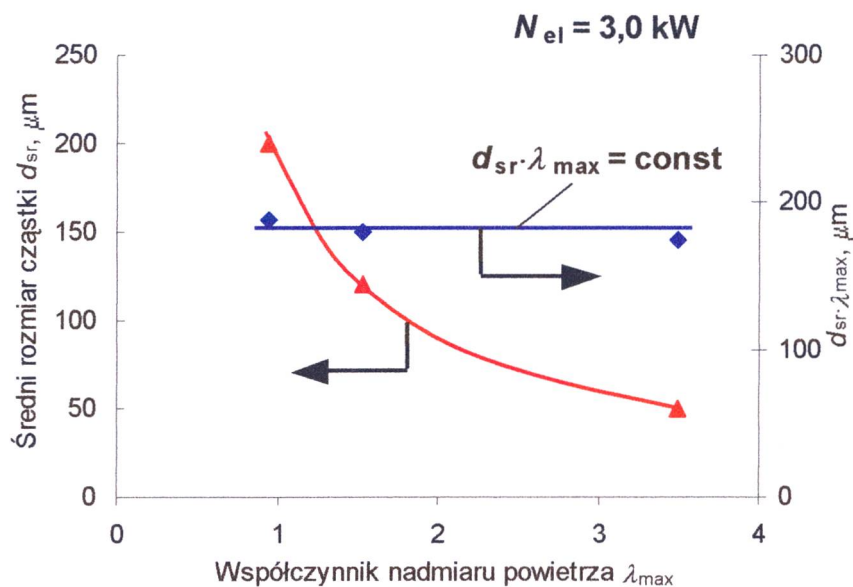
Tabela 8.1

Parametry przyjęte do obliczeń i analizy matematycznej

| Frakcja cząstek węglowych | Wartość maksymalna współczynnika nadmiaru powietrza | Średni rozmiar cząstki węglowej (obl.) |
|---------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|
| $d_o, \mu m$              | $\lambda_{max}$                                     | $d_{sr}, \mu m$                        |
| $180 < d_o < 1000$        | 0,94                                                | 200                                    |
| $80 < d_o < 180$          | 1,53                                                | 120                                    |
| $d_o < 63$                | 3,50                                                | 50                                     |

Przyjęta w tabeli 8.1 wartość  $\lambda_{max}$  oznacza na rysunku 9.16 maksymalną wartość współczynnika nadmiaru powietrza stabilnego obszaru działania plazmowego palnika pyłowego, natomiast  $d_{sr}$  średni rozmiar cząstki węglowej. Dla tak przyjętych parametrów analog liczby *Damkoehlera* przyjmuje postać  $\tilde{Da} = (d_{sr} \lambda_{max})^{-1}$ .





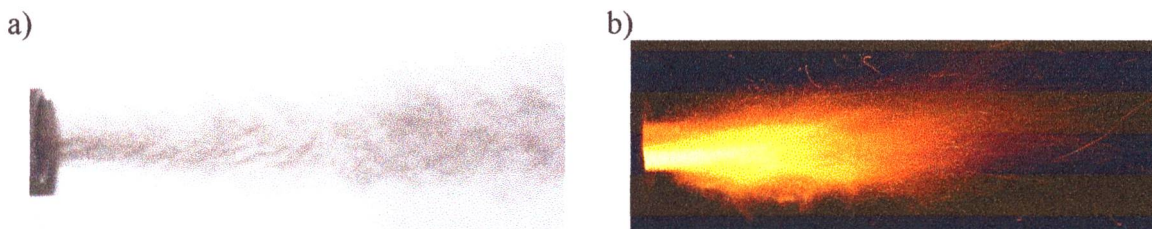
Rys. 8.7. Ważność analogu liczby Damkoehlera  $\tilde{Da} = (d_{sr}\lambda)^{-1}$  na granicy stabilności plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego

Z rysunku 8.7 wynika, że analog liczby Damkoehlera  $\tilde{Da} = (d_{sr}\lambda)^{-1}$  ma wartość stałą dla granicy stabilnego zakresu pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego. W punkcie 12.4 przedstawiono wyniki modelowania numerycznego badania poprawności tego kryterium stabilności.

## 8.2. Interpretacja matematyczna wyników badań doświadczalnych

Celem tej części pracy jest matematyczna interpretacja wyników badań doświadczalnych przedstawionych na rysunku 8.5 dotyczących stabilizacji spalania pyłu węglowego strumieniem plazmy. Interpretacji podlegać będą następujące obserwacje poczynione podczas badań eksperymentalnych pracy PPP typu cyklonowego:

- nie jest możliwe utrzymanie płomienia pyłowego bez asysty plazmy (Rys. 8.8a),
- kiedy plazmotron działa nie jest możliwe zgaszenie płomienia pyłowego (Rys. 8.8b).

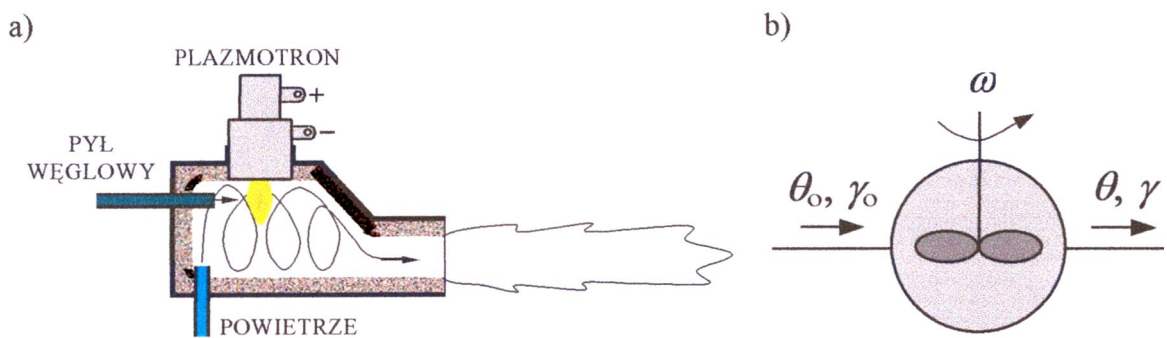


Rys. 8.8. Zdjęcia poszczególnych punktów pracy PPP typu cyklonowego: strumień mieszanki pyłowo – powietrznej w chwilę po wyłączeniu plazmotronu (a), płomień pyłowy podtrzymywany przez plazmę (b)

Przeprowadzona analiza jakościowa działania plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego została dokonana w oparciu o teorię *CSTR* (*Continuously Stirred Tank Reactor*) [84]. Podstawowym czynnikiem, którego rola będzie rozważana, jest strumień plazmy reprezentowany w modelu przez dodatkowe źródło ciepła.

### 8.2.1. Model

Rozpatrywane zagadnienie dotyczy wpływu silnego źródła energii będącego wynikiem obecności plazmy na zachowanie się *CSTR* (Rys. 8.9b). We wcześniejszych badaniach wykazano, że głównym czynnikiem wpływającym na zapłon pyłu węglowego jest temperatura, natomiast jonizacja gazu i wytworzenie ozonu podczas wyładowań elektrycznych mają pomijalne znaczenie [80]. Fizyczny przedmiot tych rozważań to plazmowy palnik pyłowy typu cyklonowego (Rys. 8.9a).



Rys. 8.9. *PPP* typu cyklonowego (a), reaktor doskonałego wymieszania (b)

Intensywne mieszanie w cyklonie i stosunkowo wolna kinetyka chemiczna spalania pyłu węglowego sprawiają, że *CSTR* wydaje się być odpowiednim modelem dla tego procesu spalania [88].

### 8.2.2. Równanie bilansowe

Przyjmować się będzie, że do reaktora dopływa struga reagentów o bezwymiarowym stężeniu  $\gamma$ , a w reaktorze jest źródło ciepła o mocy  $i$ . Reakcja chemiczna jest pierwszego rzędu. Równania zachowania energii i substancji tego nieizotermicznego przebiegu reakcji chemicznych zostaną napisane w postaci zmiennych bezwymiarowych (Dodatek A):

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{B(1-\gamma)}{t_{ch}} f(\theta) - \theta \left( \frac{1}{t_{res}} + \frac{1}{t_N} \right) + i \quad (8.12)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{(1-\gamma)}{t_{ch}} f(\theta) - \frac{\gamma}{t_{res}} \quad (8.13)$$

Bezwymiarowa szybkość reakcji  $f(\theta)$  wyrażona jest przy pomocy zredukowanej nadwyżki temperatury  $\theta$  i parametru  $\varepsilon$  będącego odwrotnością energii aktywacji:

$$f(\theta) = \exp\left(\frac{\theta}{1 + \varepsilon\theta}\right) \quad (8.14)$$

W typowych procesach spalania energia aktywacji jest bardzo wysoka, dlatego zwykle przyjmuje się, że  $\varepsilon$  jest małym parametrem ( $\varepsilon \ll 1$ ) [89]. W uproszczonej analizie, której celem jest poznanie jakościowych cech procesu wygodnie jest przyjąć w granicy  $\varepsilon = 0$ :

$$f(\theta) = \exp(\theta) \quad (8.15)$$

W teorii spalania ważną rolę odgrywają bezwymiarowe liczby *Damkoehlera*  $Da$ , stanowiące kryteria podobieństwa procesów spalania. W pracy korzystać się będzie z pierwszej liczby *Damkoehlera* (8.3), będącej stosunkiem średniego czasu przebywania  $t_{res}$  i charakterystycznego czasu reakcji chemicznej  $t_{ch}$ .

Dokonując odpowiednich przekształceń otrzymuje się:

$$\frac{d\theta}{dt} = DaB(1-\gamma)f(\theta) - \theta\left(1 + \frac{t_{res}}{t_N}\right) + I \quad (8.16)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = Da(1-\gamma)f(\theta) - \gamma \quad (8.17)$$

gdzie  $I$  oznacza bezwymiarową gęstość energii generowanej przez strumień plazmy, wyrażoną następująco:

$$I = i \cdot t_{res} \quad (8.18)$$

Ze względu na małe straty ciepłe (3 ÷ 4%) z *PPP* do otoczenia ( $t_N \gg t_{res}$ ), można przyjąć w przybliżeniu, że procesy zachodzące w palniku odbywają się w warunkach adiabatycznych ( $t_{res}/t_N = 0$ ). W celu zbadania jakościowego zachowania się stanów ustalonych układu rozpatruje się stan stacjonarny:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\gamma}{dt} = 0 \quad (8.19)$$

czyli:

$$DaB \left( 1 - \frac{\theta - I}{B} \right) \exp(\theta) = \theta - I \quad (8.20)$$

Wprowadzając nową zmienną  $\psi$  i modyfikując liczbę *Damkoehlera*:

$$\psi = \theta - I \quad (8.21)$$

$$Da' = e^I Da \quad (8.22)$$

równanie (8.20) przyjmuje taką samą postać jak dla klasycznego adiabatycznego reaktora *CSTR* [90]:

$$(B - \psi) \exp(\psi) = \frac{\psi}{Da'} \quad (8.23)$$

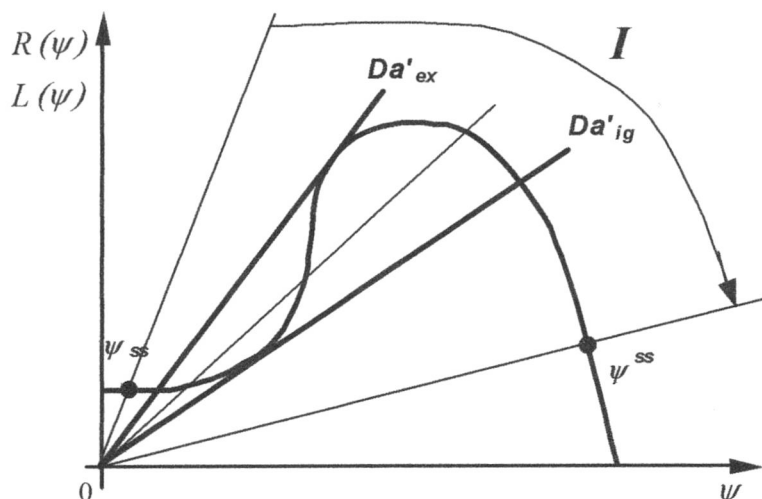
### 8.2.3. Analiza rozwiązań i ich interpretacja

Rozwiązania równania (8.23) przedstawiono graficznie na rysunku 8.10. Funkcje  $R(\psi)$  i  $L(\psi)$  reprezentują odpowiednio prawą i lewą stronę równania (8.23), ich punkty wspólne oznaczają stacjonarne rozwiązania równania. Wiadomo, że rozpatrywany układ egzotermiczny ma wielokrotne stany stacjonarne jeżeli spełniony jest warunek [91]:

$$B > 4 \quad (8.24)$$

Warunki pracy typowego palnika odpowiadają wartości liczby *Damkoehlera* z zakresu  $Da'_{ex} < Da < Da'_{ig}$ , gdzie wartości  $Da'_{ex}$  i  $Da'_{ig}$  oznaczają odpowiednio warunki krytyczne gaśnięcia i zapłonu. W tym zakresie istnieją bowiem trzy stany stacjonarne:

- dolny, odpowiadający wolnej reakcji chemicznej (bez spalania),
- górny, odpowiadający szybkiej reakcji chemicznej (ze spalaniem),
- pośredni, niestabilny (w rzeczywistości nieistniejący).



Rys. 8.10. Przedstawienie prawej i lewej strony równania (8.23) w funkcji  $\psi$



Wyniki badań doświadczalnych wskazują na dwa zakresy działania plazmowego palnika pyłowego:

- nie jest możliwe utrzymanie płomienia pyłowego bez asysty plazmy,
- strumień plazmy podtrzymuje stabilną pracę palnika pyłowego bez możliwości jego zgaszenia.

Interpretacja eksperymentalnych obserwacji opiera się na założeniu, że czas przebywania  $t_{res}$  w *PPP* jest krótki oraz, że parametr *Damkoehlera*  $Da'(I)$  zależy eksponencjalnie od mocy plazmotronu. Kiedy  $I = 0$  ( $Da' < Da'_{ex}$ ) ustala się pojedynczy stan stacjonarny z niską nadmiarową temperaturą  $\psi_{ss}$  odpowiadający stanowi „bez spalania”. Jeżeli  $Da' > Da'_{ig}$ , z powodu  $I \gg 0$ , istnieje pojedynczy stan stacjonarny z dużą intensywnością reakcji  $\psi^{ss}$  odpowiadający stanowi „ze spalaniem”.

Przeprowadzona analiza matematyczna dowodzi, że dodatkowe źródło energii  $I$  w *CSTR* może być rozpatrywane w modelu matematycznym jako modyfikacja liczby *Damkoehlera*, oraz, że strumień plazmy przełącza *PPP* typu cyklonowego ze stanu, kiedy zapłon nie jest możliwy do stanu, kiedy nie może być gaśnięcia. W teorii *CSTR* takie przełączenie nazywa się „skokiem” (ang. *jump*) [90].

### 8.3. Podsumowanie

Na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego zasadniczo wpływają: moc elektryczna plazmotronu  $N_{el}$  niezbędna do zapłonu i podtrzymania procesu spalania, współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$  oraz granulacja pyłu węglowego mająca zasadniczy wpływ na czas indukcji zapłonu.

Przeprowadzona analiza matematyczna dała dwa wyniki istotne dla interpretacji działania plazmowego palnika pyłowego. Opracowano kryterium stabilności płomienia pyłowego w postaci zmodyfikowanej liczby *Damkoehlera* (równanie 8.11). zaproponowano model matematyczny działania plazmowego palnika pyłowego, który umożliwił interpretację stwierdzonych doświadczalnie stanów stacjonarnych palnika.

## **9. Wpływ warunków zasilania oraz rodzaju i właściwości paliw na charakterystyki plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego i strumieniowego**

Efektywność zapłonu mieszanki pyłowo – powietrznej oraz zakres stabilnej pracy palnika pyłowego zależy między innymi od: mocy źródła zapłonu, składu mieszanki palnej, prędkości przepływu, stopnia zawirowania, typu palnika i właściwości paliwa. Celem tej części pracy, której wyniki przedstawia się, było zbadanie wpływu mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$ , współczynnika nadmiaru powietrza oraz ważniejszych właściwości paliw stałych na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego i strumieniowego. Do ważniejszych rozpatrywanych właściwości paliw należą między innymi: typ paliwa, jego rozdrobnienie, wilgotność, wartość opałowa, udział popiołu i części lotnych.

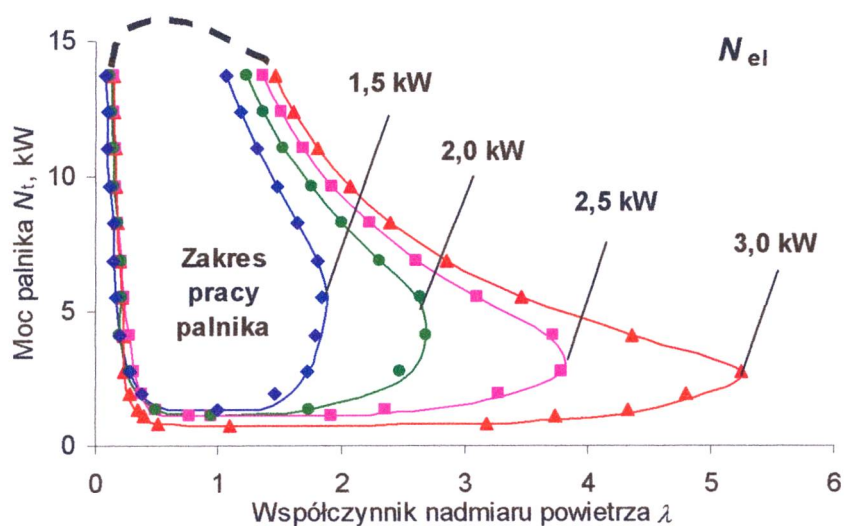
### **9.1. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu $N_{el}$ i współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda$ na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego**

Źródło zapłonu odpowiedzialne jest za wywołanie reakcji spalania i zapewnienie ciągłej gotowości do zapalenia mieszanki palnej. Ilość energii doprowadzonej do mieszanki pyłowo – powietrznej powinna wystarczyć na jej lokalne podgrzanie, wydzielenie części lotnych z węgla i ich zapłon. Urządzenie zapłonowe powinno charakteryzować się także wysoką skutecznością zapłonu nawet w trudnych warunkach (np.: przy dużych prędkościach przepływu, w szerokim zakresie współczynnika nadmiaru powietrza).

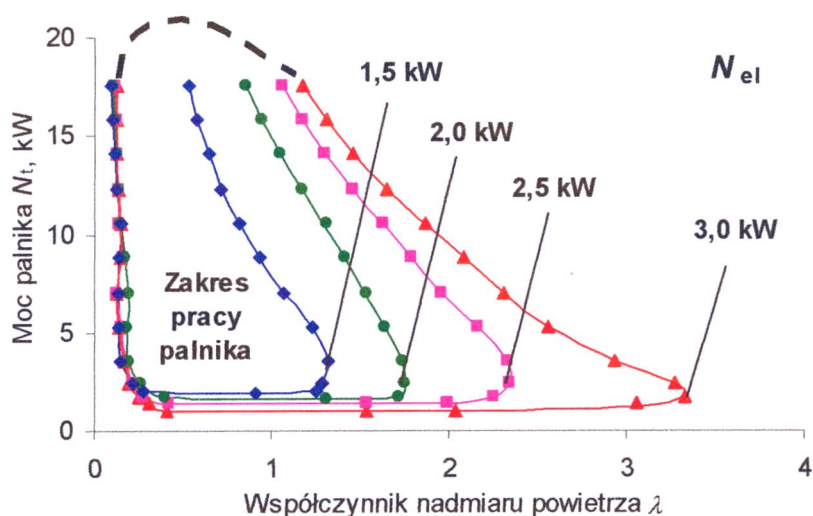
Badania przeprowadzono stosując dwa typy plazmowych palników pyłowych, cyklonowy (Rys. 6.13) i strumieniowy (Rys. 6.14), z użyciem pyłów węgla brunatnego i kamiennego oraz pyłu drzewnego (Tab. 6.2).

#### **9.1.1. Zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego**

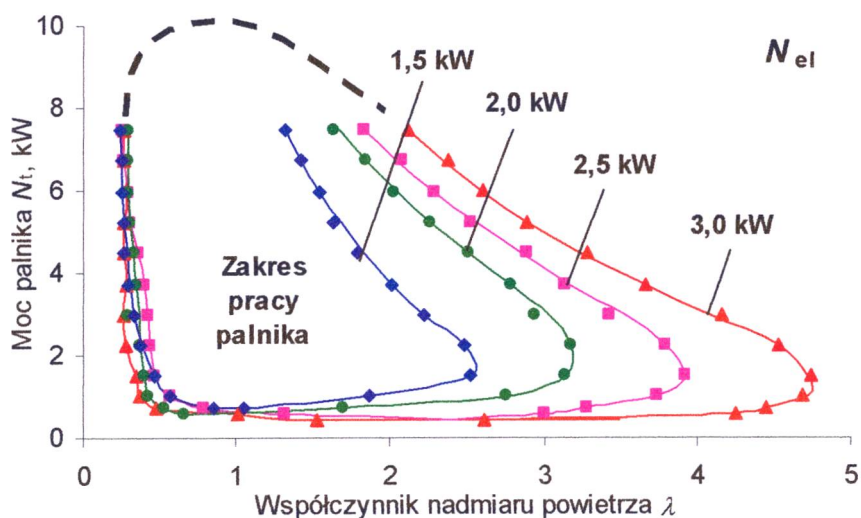
Na rysunkach 9.1 ÷ 9.3 przedstawiono wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego dla paliw użytych w badaniach.



Rys. 9.1. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (węgiel brunatny)



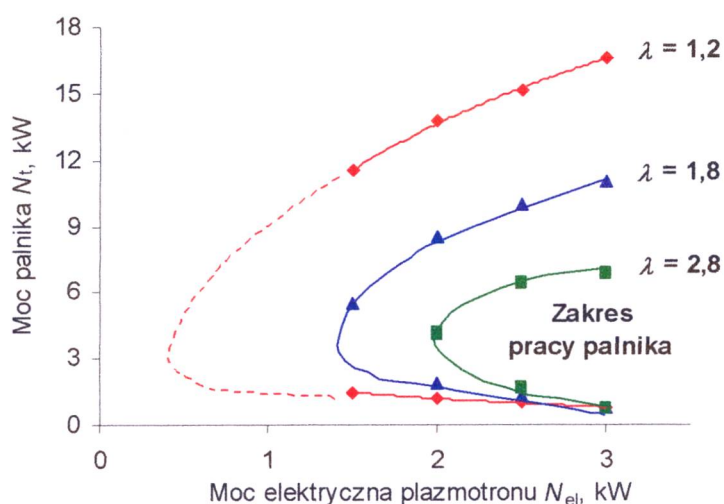
Rys. 9.2. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (węgiel kamienny)



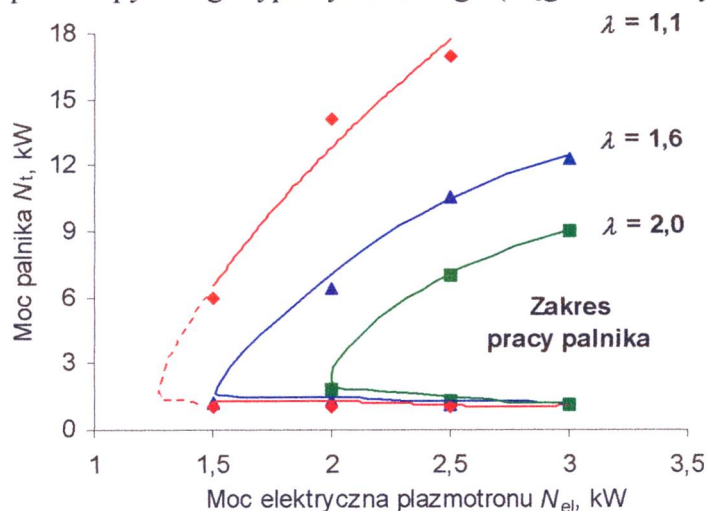
Rys. 9.3. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (pył drzewny)

Przedstawione wyniki pomiarów jednoznacznie wskazują, że moc elektryczna plazmotronu  $N_{el}$  ma zasadniczy wpływ na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego niezależnie od rodzaju spalanego paliwa. Wzrost mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  zwiększa zakres pracy palnika, poprawia warunki zapłonu i ułatwia propagację płomienia pyłowego.

Na proces spalania i stabilność płomienia pyłowego wpływa także współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$ . Graniczna wartość współczynnika nadmiaru powietrza określa zakres stabilnej pracy palnika. Zakres pracy plazmowego palnika pyłowego w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda > 1$  przedstawiono na rysunkach 9.4 ÷ 9.6.

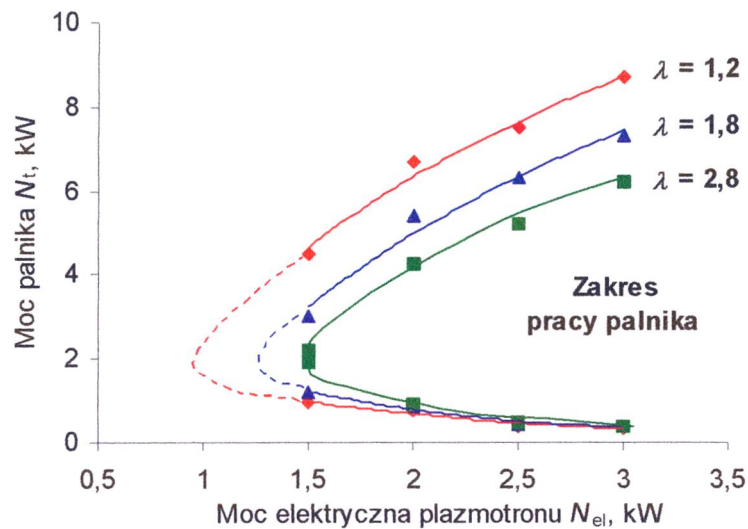


Rys. 9.4. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (węgiel brunatny)



Rys. 9.5. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (węgiel kamienny)



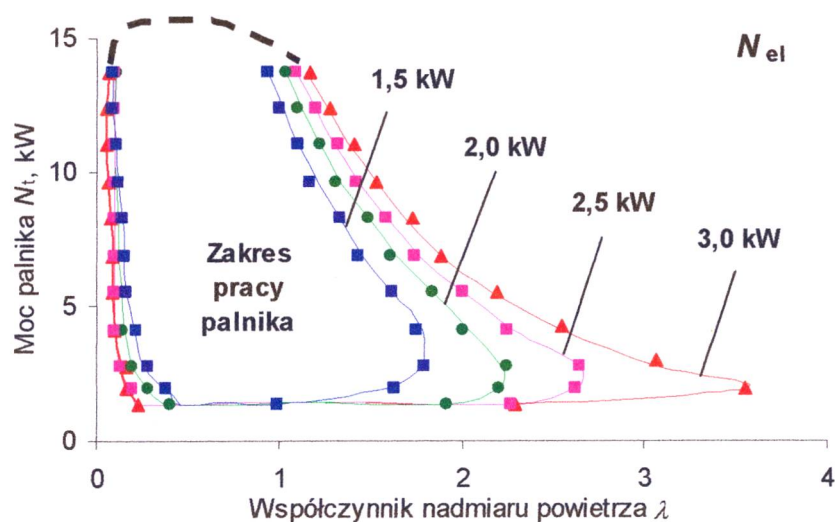


Rys. 9.6. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (pył drzewny)

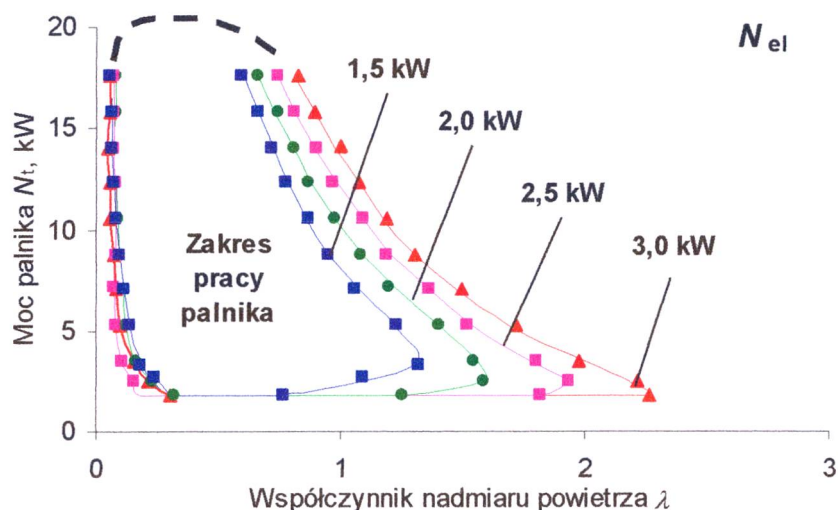
Wyniki pomiarów wykonane dla trzech typów paliw stałych pokazują, że zwiększenie współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda > 1$  powoduje istotne zmniejszenie zakresu pracy plazmowego palnika pyłowego. Analiza stabilności przeprowadzona w rozdziale ósmym wskazuje, że najważniejszym czynnikiem ograniczającym zakres pracy palnika ze wzrostem  $\lambda > 1$  jest zmniejszenie się czasu przebywania.

### 9.1.2. Zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego

Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na zakres pracy palnika typu strumieniowego przedstawiono na rysunkach 9.7 i 9.8.



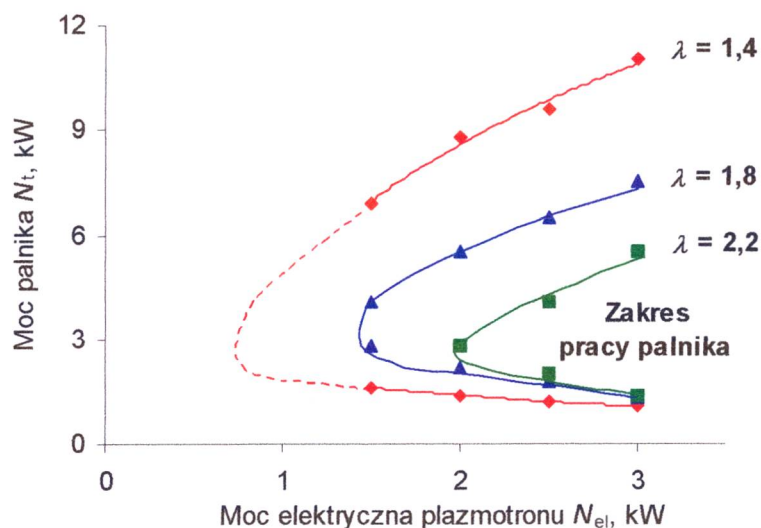
Rys. 9.7. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego (węgiel brunatny)



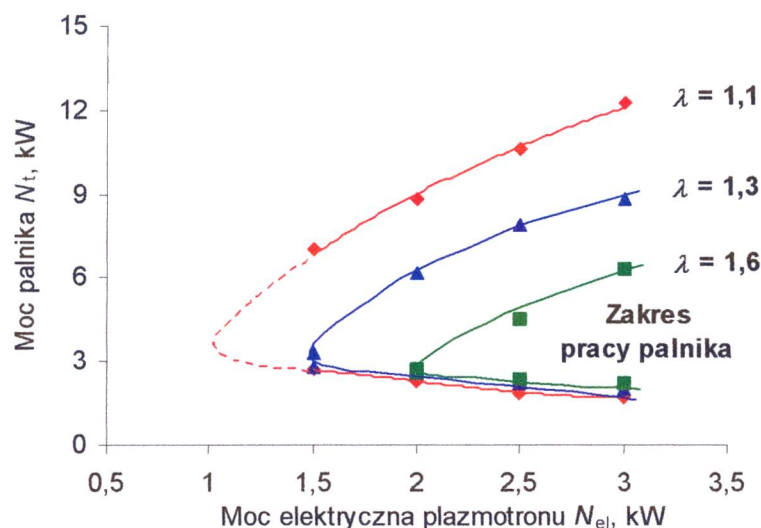
Rys. 9.8. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego (węgiel kamienny)

Zakres pracy palnika typu strumieniowego również zwiększa się ze wzrostem mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$ . Plazmowy palnik pyłowy typu strumieniowego wykazuje jednak mniejszy zakres pracy w porównaniu do palnika typu cyklonowego, co wynika prawdopodobnie z krótszego czasu przebywania cząstek paliwa w obszarze oddziaływania plazmy.

Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego pokazano na rysunkach 9.9 i 9.10.



Rys. 9.9. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego (węgiel brunatny)



Rys. 9.10. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego (węgiel kamienny)

Z przedstawionych wykresów wynika, że niezależnie od rodzaju palnika wzrost współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda > 1$  ogranicza zakres pracy plazmowego palnika pyłowego, co zmniejsza jego obszar oddziaływania cieplnego przez płomień pyłowy.

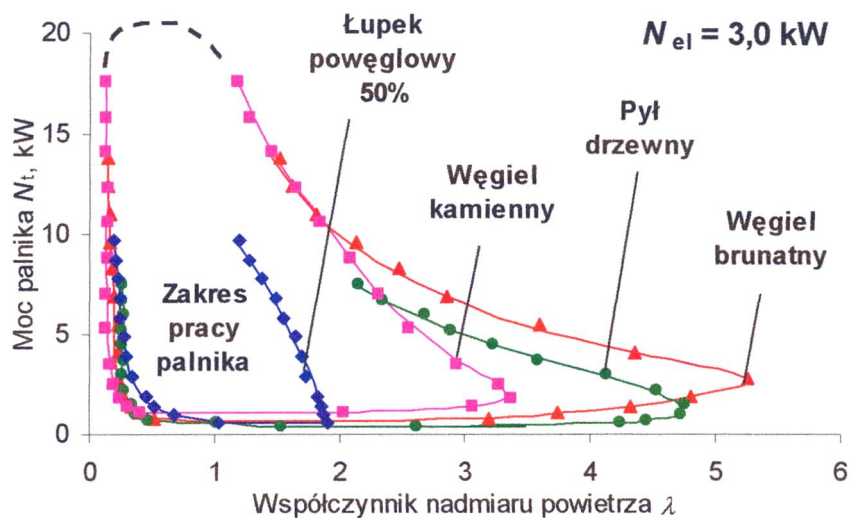
## 9.2. Wpływ rodzaju paliwa

Paliwa stałe mają zróżnicowaną zdolność do zapłonu i propagacji płomienia w mieszance pyłowo – powietrznej. Wynika to z ich różnego składu pierwiastkowego i właściwości fizykochemicznych, do których zaliczyć można: wartość opałową, skład chemiczny, zawartość części lotnych, wilgoci i popiołu oraz stopień rozdrobnienia. Zapłon i rozprzestrzenianie się płomienia pyłowego może przebiegać z różną szybkością, co ma zasadniczy wpływ na zakres stabilności płomienia pyłowego dla poszczególnych paliw [92].

Do badań użyto cztery typy paliw stałych w rozdrobnionej formie ( $d_0 < 80 \mu\text{m}$ ): węgiel brunatny, węgiel kamienny, drewno i łupka powęglowy (w tej części badań użyto mieszaninę łupka powęglowego i węgla kamiennego w stosunku 50/50). Użycie w badaniach tak różnych paliw wynika nie tylko z przyczyn naukowych, ale też ze względów praktycznych. Istnieją bowiem projekty zastosowania plazmowych palników pyłowych do rozruchu pieców cementowych opalanych różnego typu paliwami odpadowymi [93].

Właściwości użytych paliw zostały przedstawione w tabeli 6.2, przy czym ujednolicono ich wilgotność ( $W^a = 2 \div 3\%$ ) celem wyeliminowania jej wpływu na wynik pomiarów. Uzyskane wyniki badań wpływu rodzaju paliwa na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego przedstawiono na rysunku 9.11.





Rys. 9.11. Wpływ rodzaju paliwa na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego

Z otrzymanych wyników pomiarów wyraźnie wynika, że rodzaj paliwa ma ważny wpływ na zakres stabilności spalania w plazmowym palniku pyłowym. Uszeregowanie badanych paliw pod względem przydatności do spalania w plazmowym palniku pyłowym można przedstawić następująco biorąc pod uwagę pole stabilnej pracy palnika:

**węgiel brunatny > pył drzewny > węgiel kamienny > łupek powęglowy (50%)**

Widać, że takie uszeregowanie badanych paliw zgadza się z zawartością w nich części lotnych, chociaż niezupełnie, ponieważ zakres stabilności palnika dla pyłu drzewnego ( $V^a = 46,70\%$ ) jest mniejszy niż dla pyłu węgla brunatnego ( $V^a = 40,54\%$ ). Prawdopodobnie drugim ważnym czynnikiem jest udział substancji mineralnej w paliwie (Tab. 9.1).

### 9.2.1. Kryterium klasyfikacji paliw do plazmowych palników pyłowych

W pracy [94] za podstawę uszeregowania węgla pod względem wybuchowym wzięto stosunek  $V^a/A^a$ . W odniesieniu do otrzymanego uszeregowania paliw do plazmowego palnika pyłowego kryterium to jest tylko prawie zgodne, ponieważ pyły: drewna i węgla kamiennego mają identyczną wartość  $V^a/A^a = 1,0$ , ale odpowiadające im zakresy pracy palnika są bardzo różne (Rys. 9.11). Rozpatrywano jeszcze indeksy  $FC$  i  $FR$  stosowane w analizie węgla, ale żaden z nich nie pomaga wyjaśnić uzyskanego uszeregowania paliw (Tab. 9.1).



Zagadnienie wpływu właściwości fizykochemicznych paliw stałych na zakres stabilności płomienia jest ważne i znane w energetyce węglowej, ponieważ wiąże z problemem zamienności węgla (dostarczanych z różnych źródeł) spalanych w kotłach pyłowych [95]. Propozycję parametru charakteryzującego węgle z punktu widzenia ich zastosowania w kotłach pyłowych przedstawił Żelkowski [95]. Parametr ten (wskaźnik zapłonu – *ZWZ*) ujmuje zarówno udział części lotnych, jak i zdolność pyłu węglowego do samozapłonu. Przeprowadzone badania laboratoryjne (Dodatek B), które pozwoliły wyznaczyć wskaźnik zapłonu *ZWZ* dla użytych w badaniach paliw stałych, pokazały, że najlepszą zdolność do zapłonu ma pył drzewny (Tab. 9.1). Klasyfikacja paliw według wskaźnika *ZWZ* nie jest więc całkiem zgodna z uzyskanym ich uszeregowaniem na stanowisku doświadczalnym (Tab. 9.1). Niezgodność można tłumaczyć tym, że wskaźnik *ZWZ* związany odnosi się do fazy zapłonu (nagrzewania cząstek, wydzielania części lotnych i ich zapłonu), natomiast niezbyt wiernie charakteryzuje zdolność do propagacji płomienia w mieszaninie pyłowo – powietrznej.

Interesujące, że jeśli dokona się przeliczenia polegającego na pomnożeniu wskaźnika *ZWZ* przez stosunek  $V^a/A^a$ , to otrzymuje się uszeregowanie użytych w badaniach paliw stałych zgodne z wynikami doświadczalnymi (Tab. 9.1). Interpretacja tego wyniku jest trudna, ale można przypuszczać, że udział substancji mineralnej ma znaczenie dla szybkości nagrzewania się cząstek i wydzielania części lotnych.

Dla dynamiki spalania zasadnicze znaczenie ma prędkość propagacji płomienia, która jest decydująca dla stabilności płomieni i gwałtowności rozwoju wybuchów [96]. Jednym z warunków stabilności spalania jest równoważenie się prędkości napływu mieszanki palnej ze składową normalną prędkością płomienia [69]. W celu interpretacji uzyskanych wyników z tego punktu widzenia wykorzystany będzie związek między prędkością propagacji płomienia, a zmianą ciśnienia wybuchu w zamkniętym zbiorniku, który można wyznaczyć z ogólnej definicji szybkości spalania [97, 98]:

$$\frac{\partial \rho_u V_u}{\partial t} = -\rho_u A S_u \quad (9.1)$$

Zagadnienie to zostało rozwiązane dla laminarnego spalania gazów [98], ale w przypadku płomieni turbulentnych, zwłaszcza rozwijających się w mieszaninie pyłowo – powietrznej, związek między prędkością propagacji płomienia, a zmianami ciśnienia wybuchu nie jest tak oczywisty [94, 99]. Wykazano jednak, że i dla spalania turbulentnego istnieje możliwość interpretacji zmian ciśnienia wybuchu pyłowego dającej prędkość

propagacji płomienia pyłowego (Dodatek C). Wynik ważny dla modelowania dynamiki wybuchów pyłowych i dający podstawę do interpretacji wyników przedstawionych badań.

Standardowym parametrem charakteryzującym dynamikę wybuchów w zamkniętym zbiorniku jest parametr  $K_{st}$ , który jest w liniowym związku z prędkością propagacji płomienia (Dodatek C) [100]. Wykonano więc pomiary wartości współczynnika  $K_{st}$  dla użytych w badaniach paliw z zastosowaniem komory wybuchowej o objętości 20 dm<sup>3</sup> (Dodatek D). Wyniki pomiarów podano w tabeli 9.1. Okazuje się, że wartości  $K_{st}$  układają się w porządku zgodnym z uszeregowaniem paliw otrzymanym w omawianym eksperymencie (Tab. 9.1).

Tabel 9.1

Uszeregowanie paliw pod względem przydatności do plazmowego palnika pyłowego

| Parametr              | Jednostka  | Węgiel brunatny | Pył drzewny | Węgiel kamienny | Łupek powęglowy 50% | Łupek powęglowy |
|-----------------------|------------|-----------------|-------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| $\lambda_{max}$       | -          | 5,2             | 4,7         | 3,4             | 1,9                 | -               |
| $V^a$                 | %          | 40,54           | 46,70       | 24,95           | 18,1                | 11,24           |
| $A^a$                 | %          | 19,46           | 47,04       | 24,95           | 51,53               | 78,12           |
| $V^a/A^a$             | -          | 2,08            | 1,0         | 1,0             | 0,35                | 0,14            |
| $FC^a$                | %          | 28,1            | 3,53        | 48,81           | 28,77               | 9,04            |
| $FR^a$                | -          | 0,69            | 0,07        | 1,95            | 1,59                | 0,80            |
| $K_{st}$              | MPa·m/s    | 7,76            | 6,44        | 5,35            | 4,23                | 2,96            |
| ZWZ                   | kJ/(kg·°C) | 8,55            | 15,81       | 5,49            | 3,25                | 0,35            |
| $ZWZ \cdot (V^a/A^a)$ | kJ/(kg·°C) | 17,78           | 15,81       | 5,49            | 1,14                | 0,05            |

Znaczenie tego odkrycia wykracza poza sferę palników plazmowych, wydaje się, że parametr  $K_{st}$  może być użyty dla klasyfikacji węgla ze względu na ich zastosowanie w palnikach i paleniskach pyłowych; potwierdzenie tej tezy wymaga jednak jeszcze dodatkowych badań. Ze względów praktycznych ważne jest to, że parametr  $K_{st}$  można szybko i łatwo wyznaczyć oraz, że istnieje aparatura i procedura jego pomiarów [101].

### 9.3. Wpływ właściwości fizykochemicznych paliwa

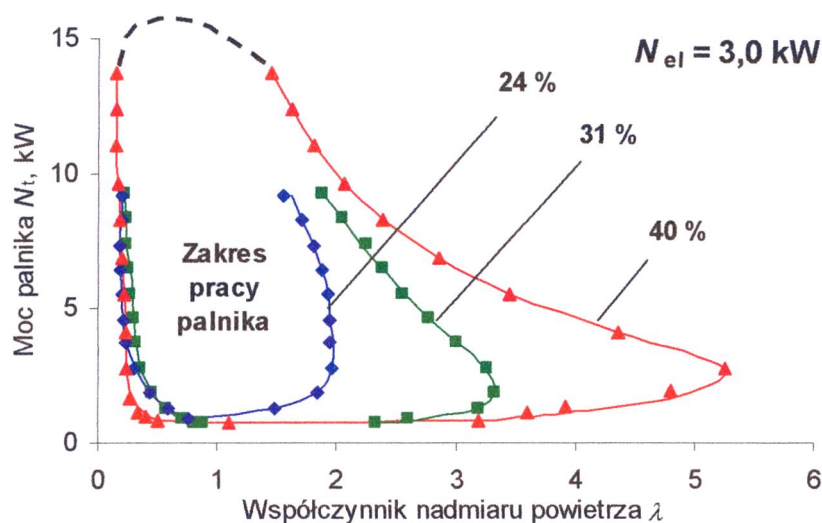
Znaczenie właściwości paliw dla zakresu pracy plazmowego palnika pyłowego jest szczególnie ważne, kiedy rozruch kotła pyłowego następuje ze stanu „zimnego”. W takim przypadku wymagane właściwości paliwa (części lotne, popiół, rozdrobnienie, wilgotność) mogą mieć ważne znaczenie dla zastosowania praktycznego plazmowego systemu rozruchowego.

### 9.3.1. Wpływ części lotnych

Zawartość części lotnych w paliwie ma zasadniczy wpływ na proces zapłonu paliw stałych i stabilność płomienia pyłowego. Uwalniają się one w wyniku rozkładu termicznego substancji organicznej, w czasie którego struktura węgla ulega głębokim przemianom fizycznym i chemicznym. W skład części lotnych wchodzi: metan, wodór, tlenek i dwutlenek węgla, para wodna oraz lekkie węglowodory [63]. Ciekłym produktem termicznego rozkładu węgla jest smoła. Udział poszczególnych składników w mieszaninie gazowej zależy od typu węgla i warunków jego nagrzewania. W lotnych produktach pirolizy węgla brunatnych przeważa tlenek węgla, a w przypadku węgla kamiennych metan [102, 103].

Uwalnianie części lotnych z węgla silnie zależy przede wszystkim od temperatury, ważny jest też rozmiar cząstek węgla. Nagrzewanie cząstek węgla z szybkością powyżej  $10^4$  K/s powoduje wydzielanie większej ilości części lotnych, niż w warunkach powolnego wygrzewania [104], co ma duże znaczenie dla szybkości spalania mieszaniny pyłowo – powietrznej. Duża zawartość części lotnych sprzyja również zjawisku dylatacji cząstek węglowych (zwiększaniu objętości ziaren), co może przyczyniać się do ich gwałtownego rozpadu i zmniejszenia rozmiarów. Czas spalania części lotnych nie przekracza zwykle 20% całkowitego czasu spalania cząstki węglowej. Dlatego czas spalania cząstek węgla zawierających więcej części lotnych (węgiel brunatny) jest znacznie krótszy od czasu spalania ziaren węgla o małej ich zawartości (antracyt) [105].

W celu zbadania wpływu udziału części lotnych w węglu  $V^a$  na plazmowy zapłon i stabilizację w plazmowym palniku pyłowym wykonano badania z użyciem pyłu węgla brunatnego, oraz jego półkoksów (frakcja cząstek  $d_0 < 80 \mu m$ ). Celem zróżnicowania zawartości substancji lotnych, węgiel brunatny częściowo odgazowano. Sposób przygotowania próbek węgla do badań i właściwości półkoksów opisano w punkcie 6.3.



Rys. 9.12. Wpływ zawartości części lotnych  $V^a$  (%) w węglu brunatnym na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego

Przedstawione na rysunku 9.12 wyniki pomiarów dowodzą, że wzrost zawartości części lotnych w paliwie ułatwia oraz przyspiesza proces zapłonu i spalania pyłu węglowego, co w efekcie prowadzi do poprawy stabilności oraz zwiększenia zakresu pracy plazmowego palnika pyłowego.

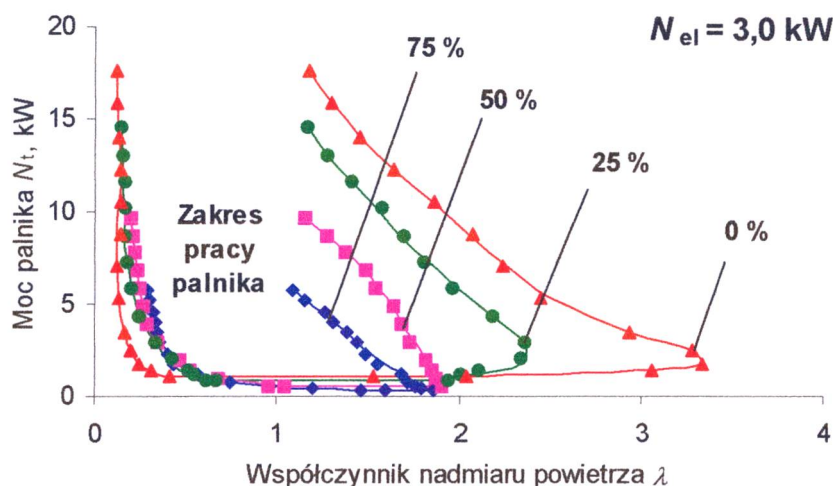
Należy zaznaczyć, że próby uruchomienia plazmowego palnika pyłowego zasilanego pyłem koksu węgla brunatnego (całkowite odgazowanie) w przyjętych warunkach pomiarowych nie powiodły się. Oznacza to, że obecność części lotnych w paliwie stałym jest niezbędna dla działania plazmowego palnika pyłowego.

### 9.3.2. Wpływ substancji mineralnej

Substancja mineralna (popiół) w paliwie jest balastem, który powoduje obniżenie wartości opałowej paliwa oraz pogorszenie warunków zapłonu, spalania i wymiany ciepła. Wynika to z faktu, że część wydzielonego ciepła ze spalania węgla i innych części palnych tracone jest na podgrzewanie popiołu, który nie bierze udziału w spalaniu. Ponadto cząstki popiołu ekranują cząstki palne węgla przed promieniowaniem cieplnym pochodzącym ze spalania części lotnych czy pozostałości koksowej innych cząstek węgla [34].

W celu zbadania wpływu zawartości substancji mineralnej na stabilność płomienia i zakres pracy plazmowego palnika pyłowego, mieszano ze sobą pyły ( $d_0 < 80 \mu\text{m}$ ): węgla kamiennego i łupka powęglowego. Łupek powęglowy charakteryzuje się bowiem dużym udziałem  $\text{SiO}_2$  (Tab. 6.2). W przeprowadzonych badaniach udział łupka powęglowego w mieszance palnej wynosił odpowiednio: 0, 25, 50 i 75%.





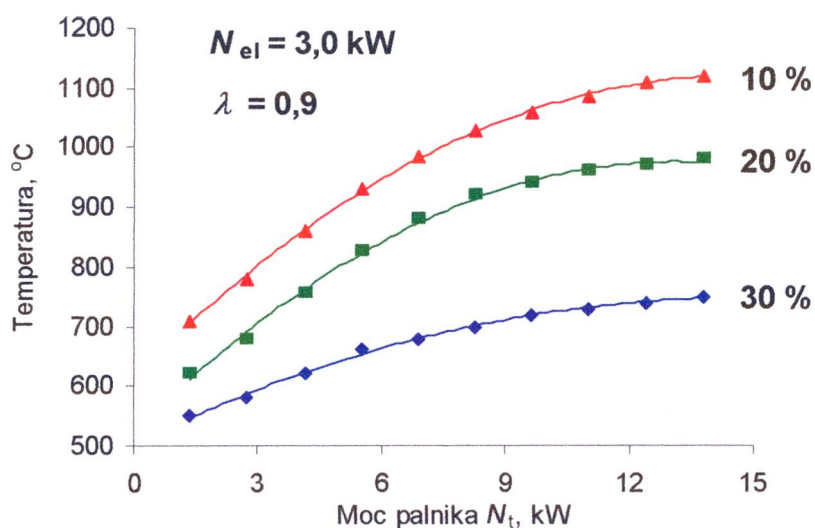
Rys. 9.13. Wpływ zawartości substancji mineralnej w paliwie stałym (udział łupka powęglowego %) na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego

Wyniki pomiarów potwierdzają, że zwiększenie udziału substancji mineralnej w paliwie pogarsza efektywność stabilizacji płomienia pyłowego plazmą oraz zmniejsza moc płomienia pyłowego przy ustalonym strumieniu paliwa (Rys. 9.13). Wynika to z faktu, że część wydzielonego ciepła ze spalania substancji organicznej tracona jest na podgrzewanie popiołu, który nie bierze udziału w spalaniu.

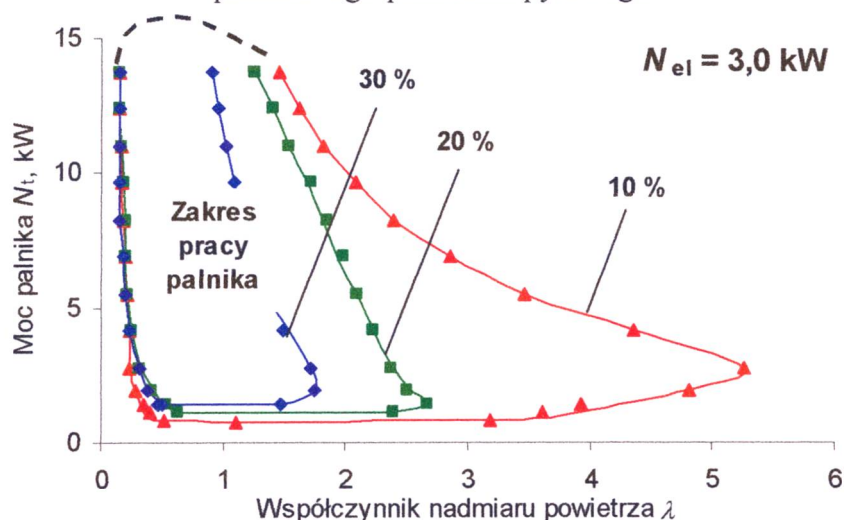
### 9.3.3. Wpływ wilgotności

Wilgoć jest także balastem w paliwie, ponieważ zmniejsza jego wartość opałową. Wzrost wilgotności zmniejsza lotność pyłu, utrudnia jego rozpylenie w powietrzu i obniża temperaturę płomienia, co ma wpływ na rozwój procesu spalania (Rys. 9.14). Ponadto powoduje straty ciepłone, co związane jest z dużym ciepłem właściwym wody i stratami na jej parowanie. W rezultacie duża ilość ciepła dostarczana do mieszanki pyłowo – powietrznej jest tracona na odparowanie wilgotności, co podnosi zapotrzebowanie na energię zapłonu pyłu węglowego. Wilgoć wchodząca w skład części niepalnych wpływa ujemnie również na zdolność do propagacji płomienia w mieszance pyłowo – powietrznej, ze względu na ekranowanie cząstek pyłu węglowego przed działaniem promieniowania światła pochodzącego z reakcji spalania części lotnych lub pozostałości koksowej [34].

Celem sprawdzenia wpływu wilgotności na efektywność plazmowego zapłonu pyłu węglowego w badaniach użyto pyłu węgla brunatnego ( $d_0 < 80 \mu\text{m}$ ) o zawartości wody 10, 20 i 30%.



Rys. 9.14. Wpływ udziału wody w węglu brunatnym na temperaturę plazmowego płomienia pyłowego



Rys. 9.15. Wpływ udziału wody w węglu brunatnym (%) na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego

Z wyników przeprowadzonych pomiarów można wnioskować, że zwiększenie udziału wody w węglu znacząco ogranicza zakres stabilizacji plazmowego płomienia pyłowego (Rys. 9.15). Ważnym wnioskiem praktycznym jest, że zawartość wilgoci ponad  $20 \div 25\%$  w węglu uniemożliwia uzyskanie stabilnego płomienia pyłowego w oczekiwanym zakresie typowych wartości współczynnika nadmiaru powietrza dla palników pyłowych.

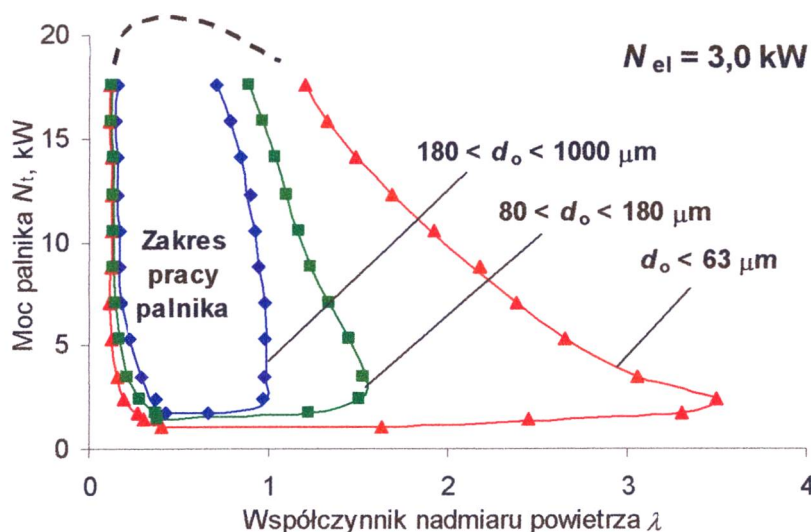
### 9.3.4. Wpływ rozdrobnienia paliwa stałego

Rozdrobnienie paliwa stałego odgrywa ważną rolę w procesie spalania, ponieważ proces propagacji płomienia w mieszaninie pyłowej przebiega na drodze indywidualnego spalania cząstek i ich aglomeracji [53]. W czasie rozwoju płomienia znaczenie ma spalanie

części lotnych [106] oraz udział małych cząstek w mieszaninie [94], gdyż dynamika zapłonu zależy od ich rozmiaru [86, 107]. Rozdrobnienie paliwa stałego ma wpływ również na lotność pyłu oraz jego rozpylenie w obrębie palnika, co ma duże znaczenie dla jakości spalania i emisji  $NO_x$  [34].

Co prawda temperatura krytyczna zapłonu rośnie ze zmniejszeniem rozmiaru cząstki węgla  $d_o$ , ale czas indukcji zapłonu szybko maleje ze zmniejszaniem  $d_o$  [87]. Ważne znaczenie ma wzrost powierzchni reagowania paliwa z tlenem wraz z jego rozdrobnieniem. To tłumaczy dlaczego prędkość propagacji płomienia pyłowego zwiększa się z lepszym rozdrobnieniem paliwa oraz dlaczego  $DGW$  (dolna granica wybuchowości) jest mniejsza dla drobniejszych frakcji [53]. Można więc stwierdzić, że propagacja płomienia w mieszaninie pyłowo – powietrznej kontrolowana jest przez udział drobnych frakcji pyłu. Duże cząstki węglowe mogą przejść przez płomień nie reagując wcale lub tylko częściowo, chociaż mogą wydzielać części lotne, o ile zostały nagrzane do odpowiedniej temperatury [53].

Do badań wpływu rozdrobnienia paliwa na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego wykorzystano pył węgla kamiennego (Tab. 6.2), który przesiano przez sita o rozmiarach oczek: 1000, 180, 80 i 63  $\mu m$ . W ten sposób otrzymano trzy próbki pyłu węglowego o następujących przedziałach granulacji:  $d_o < 63 \mu m$ ,  $80 < d_o < 180 \mu m$  oraz  $180 < d_o < 1000 \mu m$ .



Rys. 9.16. Wpływ rozdrobnienia węgla kamiennego na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego

Otrzymane wyniki pomiarów wskazują na duży wpływ rozdrobnienia paliwa stałego na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego (Rys. 9.16). Zakres działania plazmowego palnika pyłowego jest większy dla drobniejszych frakcji.



Przedstawione wyniki pomiarów były przedmiotem analizy w punkcie 8.1.1, w którym wykazano, iż rozdrobnienie paliw stałego jest jednym z zasadniczych czynników decydujących o stabilności płomienia pyłowego.

#### **9.4. Dyskusja wyników**

Poprawne działanie palnika wymaga stabilnego płomienia, co wiąże się z rodzajem paliwa i organizacją spalania. Dotyczy to także plazmowego palnika pyłowego, który jako stosunkowo nowe rozwiązanie wymaga jeszcze wielu badań w zakresie konstrukcji i właściwości stosowanych paliw.

Przeprowadzone badania dają pogląd, jak ważniejsze cechy rozdrobnionych paliw stałych wpływają na efektywność zapłonu mieszanki pyłowo – powietrznej plazmą termiczną. Generalnie stwierdzono, że pogorszenie jakości paliwa zawęży zakres stabilnej pracy plazmowego palnika pyłowego. Szczególnie istotny jest wpływ rozdrobnienia paliwa. Ważna jest także rola części lotnych, ale nie należy jej rozpatrywać w oderwaniu od zawartości substancji mineralnej w paliwie.

Wyniki tej części pracy wskazują na dopuszczalne dla stabilnej pracy plazmowego palnika pyłowego zmiany właściwości paliw. Jest to ważne z praktycznego punktu widzenia, ponieważ jednym z zasadniczych problemów rozwoju plazmowego systemu rozpałkowego jest konieczność działania instalacji rozruchowej w warunkach pracy kotła „na zimno”. W takich warunkach ważne jest na przykład zawilgocenie węgla, które może nawet uniemożliwić działanie plazmowego palnika pyłowego.

Wydaje się, że istotne znaczenie dla oceny przydatności rozdrobnionych paliw stałych do plazmowych palników pyłowych może mieć proponowany współczynnik wybuchowości  $K_{st}$ . Być może, po dalszych badaniach, okaże się on przydatnym parametrem do oceny zamienności węgla w palnikach i paleniskach pyłowych.

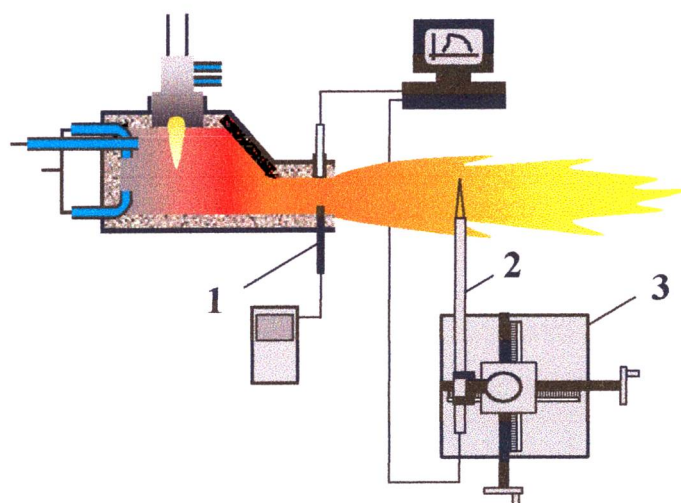


## 10. Właściwości płomieni pyłowych generowanych w plazmowych palnikach pyłowych typu cyklonowego i strumieniowego

Celem tej części pracy było zbadanie wpływu niektórych cech plazmowego palnika pyłowego na parametry generowanego płomienia pyłowego (temperatury maksymalnej płomienia, rozkładu temperatury płomienia w przekroju poprzecznym i wzdłuż osi, długość płomienia pyłowego). Znaczenie parametrów płomienia pyłowego wynika z przeznaczenia plazmowego palnika pyłowego, którego zadaniem jest podtrzymanie działania rozpałkowego palnika dużej mocy ( $10 \div 60 \text{ MW}_t$ ). Do badań użyto pyłu węgla brunatnego i kamiennego, których właściwości zawarto w tabeli 6.2.

### 10.1. Stanowisko do badań płomienia pyłowego stabilizowanego plazmą

W celu wykonania pomiarów związanych z badaniem właściwości płomieni stabilizowanych plazmą wyposażono stanowisko badawcze przedstawione na rysunku 6.7 w dodatkowy układ pomiarowy umożliwiający sondowanie płomienia w przekroju poprzecznym oraz wzdłuż jego osi (Rys. 10.1). Układ pomiarowy składał się z miernika temperatury z dołączoną termoparą  $PtRh10\%-Pt$  (2) oraz suportu (3) do zmiany położenia termopary w płomieniu pyłowym.



Rys. 10.1. Stanowisko do badań płomienia pyłowego:  
1 – termopara  $NiCr-Ni$ , 2 – termopara  $PtRh10\%-Pt$ , 3 – suport

Badania prowadzono w ten sposób, że dla ustalonej mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$ , danych strumieni przepływu paliwa i powietrza mierzono za pomocą termopary (1) temperaturę płomienia pyłowego na wylocie z plazmowego palnika pyłowego, natomiast termoparą (2) mierzono temperaturę lokalną płomienia. Następnie za pomocą suportu (3) zmieniano położenie termopary (2). Pomiarów dokonywano w przekroju wzdłużnym oraz

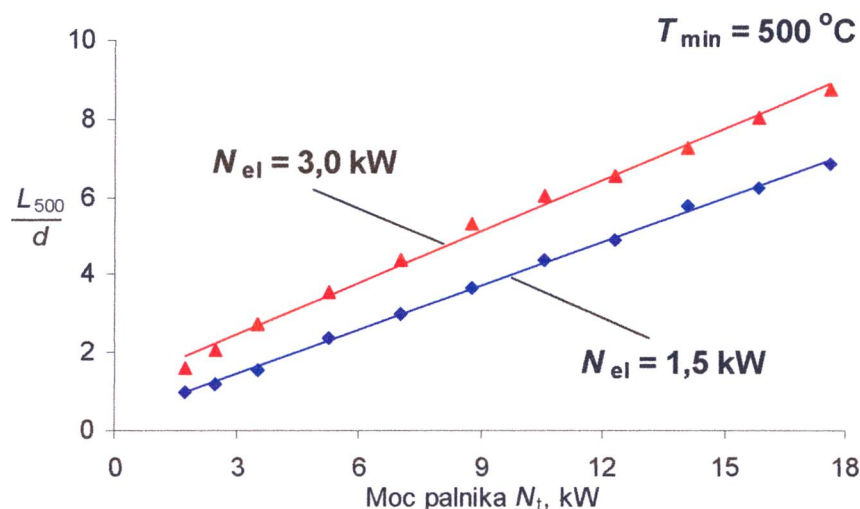
poprzecznym płomienia na jego osi. Wartość przesunięcia termopary w przypadku rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym wynosiła  $r/d = 0,1$  (średnica wylotowa plazmowego palnika pyłowego  $d = 24$  mm).

Przemieszczając termoparę (2) wzdłuż osi płomienia wyznaczono również *umowną długość płomienia pyłowego*  $L_{500}$ . Przez *umowną długość plazmowego płomienia pyłowego*  $L_{500}$  oznaczono odległość od wylotu palnika pyłowego do miejsca na osi, w którym temperatura zmalała do  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Argumentem wyboru temperatury  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  dla *umownej długości płomienia pyłowego*  $L_{500}$  było przyjęcie przez Żelkowskiego [108] tej temperatury w indeksie zapłonu pyłu węglowego ZWZ, stworzonego dla porównawczej oceny przydatności węgla do stabilnego spalania w płomieniu pyłowym.

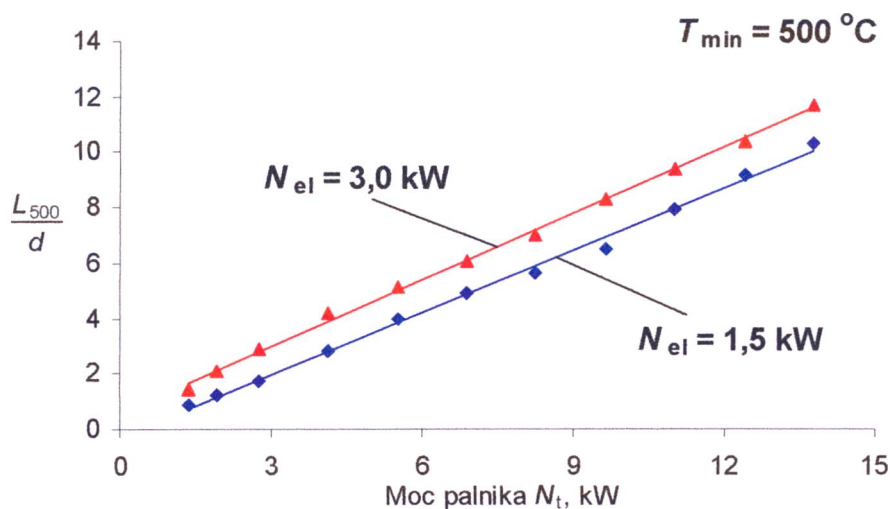
W celu wyznaczenia maksymalnej temperatury płomienia pyłowego, dla ustalonej mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  i ustalonego strumienia paliwa, zmieniano strumień powietrza wtórnego do momentu, aż została osiągnięta maksymalna temperatura, która była mierzona termoparą (1). W ten sposób, zmieniając strumień paliwa i moc elektryczną plazmotronu  $N_{el}$ , uzyskano wyniki przedstawiające wpływ mocy cieplnej palnika  $N_t$  i mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na maksymalną temperaturę płomienia pyłowego  $T_{max}$ . Zbadano także wpływ wilgoci zawartej w paliwie na temperaturę płomienia pyłowego (Rys. 9.14).

## **10.2. Wpływ warunków zasilania plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego na *umowną długość płomienia pyłowego* $L_{500}$**

Znaczenie *umownej długości płomienia pyłowego*  $L_{500}$  wynika także z przeznaczenia plazmowego palnika pyłowego, ponieważ długi i gorący płomień pyłowy będzie w stanie podtrzymać działanie palnika pyłowego dużej mocy. Wyniki pomiarów długości płomienia pyłowego z palnika typu cyklonowego dla poszczególnych węgla przedstawiono na rysunkach 10.2 i 10.3.



Rys. 10.2. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  i mocy cieplnej  $N_t$  plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego na *umowną długość płomienia pyłowego*  $L_{500}$  (węgiel kamienny)



Rys. 10.3. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  i mocy cieplnej  $N_t$  plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego na *umowną długość płomienia pyłowego*  $L_{500}$  (węgiel brunatny)

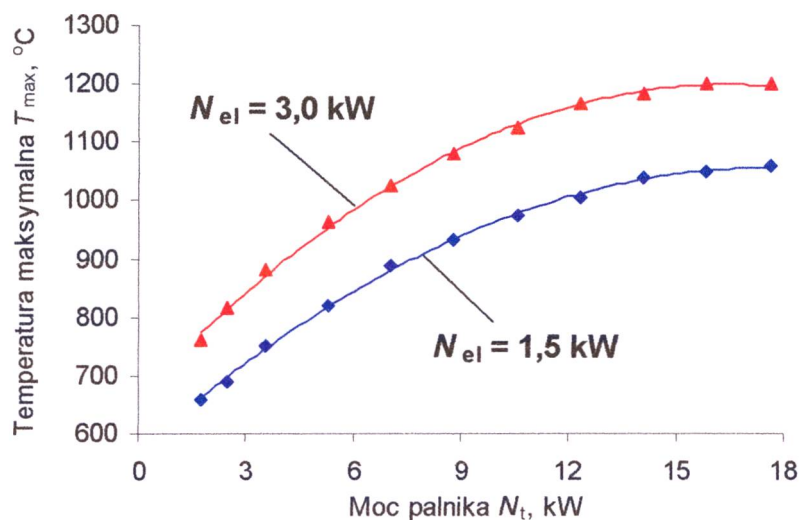
Z otrzymanych wyników pomiarów wynika, że *umowna długość plazmowego płomienia pyłowego*  $L_{500}$  wzrasta proporcjonalnie do mocy cieplnej palnika  $N_t$ . Moc plazmotronu  $N_{el}$  nieznacznie wpływa na zwiększenie *umownej długości plazmowego płomienia pyłowego*  $L_{500}$ .

### 10.3. Rozkłady temperatury w płomieniu pyłowym – plazmowy palnik pyłowy typu cyklonowego

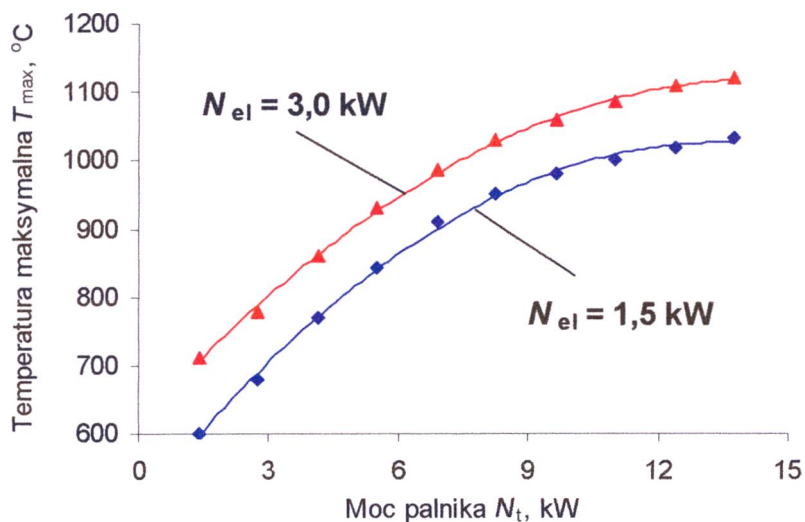
Z energetycznego punktu widzenia istotne jest określenie wpływu mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na maksymalną temperaturę płomienia pyłowego na wylocie z palnika. Z jednej strony korzystne jest uzyskanie maksymalnej temperatury płomienia

zapewniającej efektywne przekazywanie ciepła, z drugiej strony jednak należy minimalizować nakład energetyczny celem obniżenia kosztów plazmowego rozruchu kotła pyłowego.

Na rysunkach 10.4 i 10.5 przedstawiono wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  i mocy cieplnej palnika  $N_t$  na temperaturę maksymalną płomienia pyłowego.



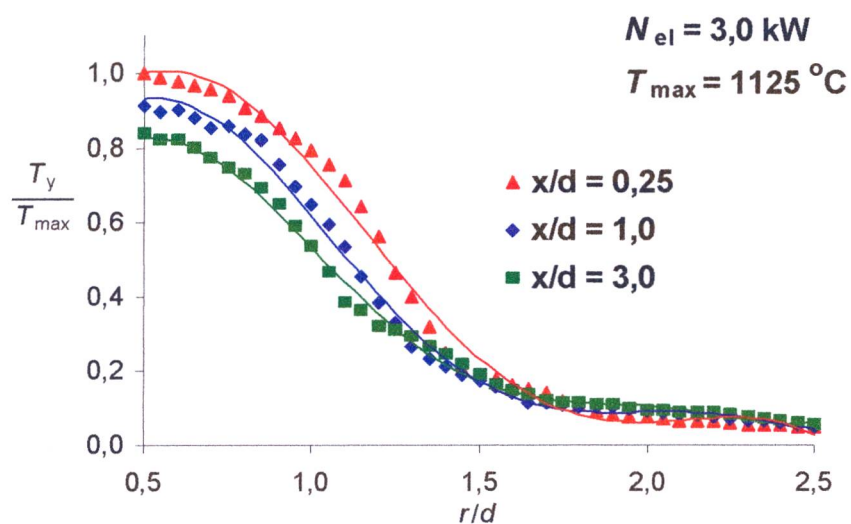
Rys. 10.4. Wpływ mocy cieplnej palnika  $N_t$  typu cyklonowego i mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na temperaturę maksymalną płomienia pyłowego (węgiel kamienny)



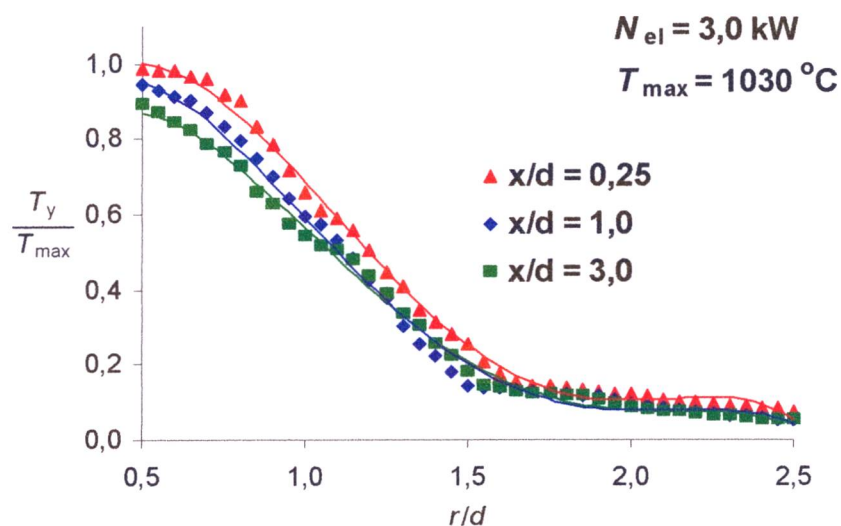
Rys. 10.5. Wpływ mocy cieplnej palnika  $N_t$  typu cyklonowego i mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na temperaturę maksymalną płomienia pyłowego (węgiel brunatny)

Ważną właściwością płomieni pyłowych są rozkłady temperatur w przekroju poprzecznym (Rys. 10.6 i 10.7) i wzdłużnym (Rys. 10.8 i 10.9). Ich znajomość pozwala na określenie obszaru oddziaływania cieplnego i będzie pomocna w zaprojektowaniu instalacji rozpałkowej.



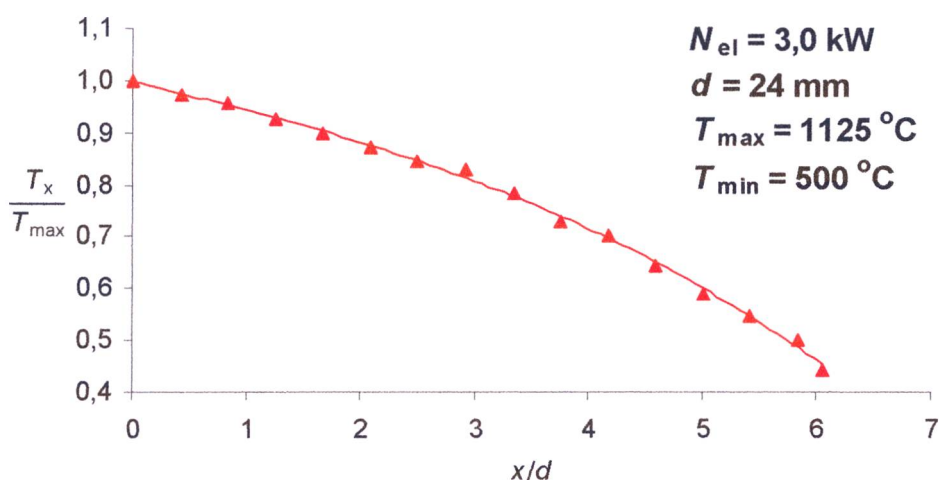


Rys. 10.6. Rozkład temperatury płomienia pyłowego z plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego w przekroju poprzecznym (węgiel kamienny, węgiel  $q_{mw} = 1,5 \text{ kg/h}$ )

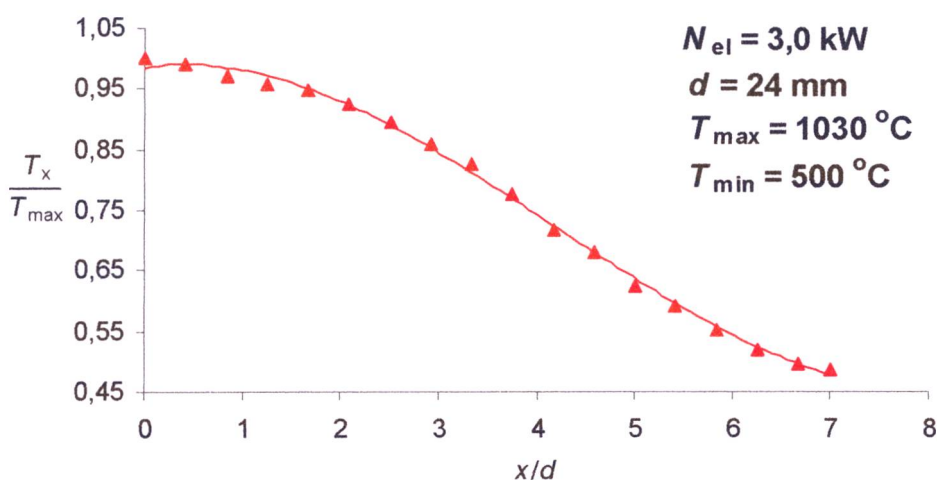


Rys. 10.7. Rozkład temperatury płomienia pyłowego z plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego w przekroju poprzecznym (węgiel brunatny,  $q_{mw} = 1,5 \text{ kg/h}$ )

Szybki spadek temperatury w płomieniu pyłowym z oddaleniem od jego osi należy tłumaczyć „zimnym” otoczeniem płomienia.



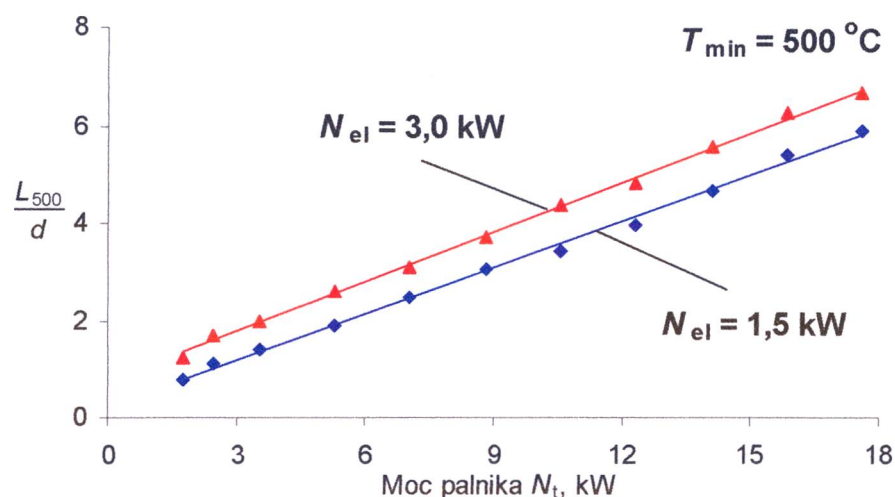
Rys. 10.8. Rozkład temperatury płomienia pyłowego z plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego wzdłuż osi (węgiel kamienny,  $q_{mw} = 1,5 \text{ kg/h}$ )



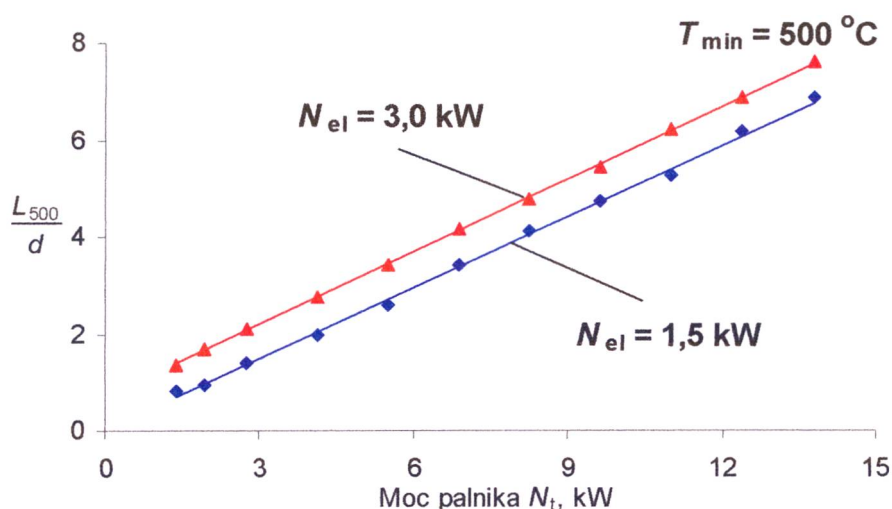
Rys. 10.9. Rozkład temperatury płomienia pyłowego z plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego wzdłuż osi (węgiel brunatny,  $q_{mw} = 1,5 \text{ kg/h}$ )

#### 10.4. Wpływ warunków zasilania plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego na umowną długość płomienia pyłowego $L_{500}$

Badania płomienia pyłowego generowanego w plazmowym palniku pyłowym typu strumieniowego zostały przeprowadzone w taki sam sposób, jak w punkcie 10.3. Wyniki pomiarów wpływu mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  i mocy cieplnej palnika  $N_t$  na umowną długość plazmowego płomienia pyłowego  $L_{500}$  przedstawiono na rysunkach 10.10 i 10.11.



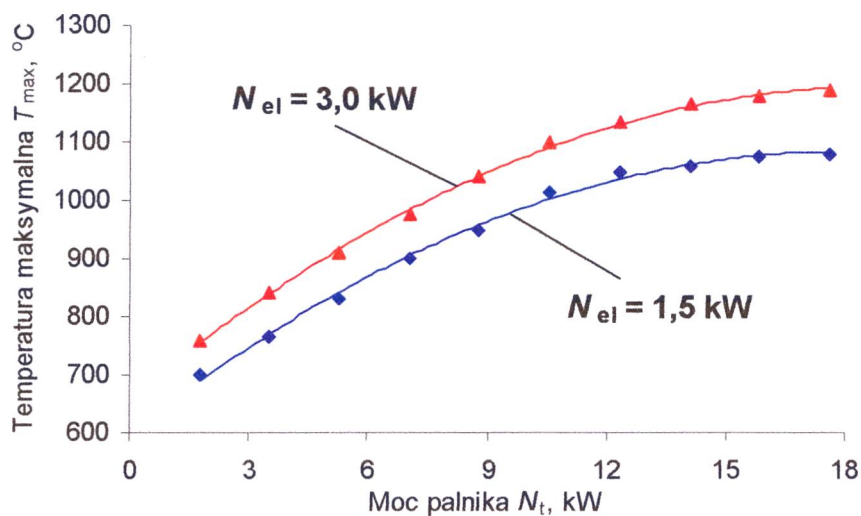
Rys. 10.10. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  i mocy cieplnej  $N_t$  plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego na *umowną długość płomienia pyłowego*  $L_{500}$  (węgiel kamienny)



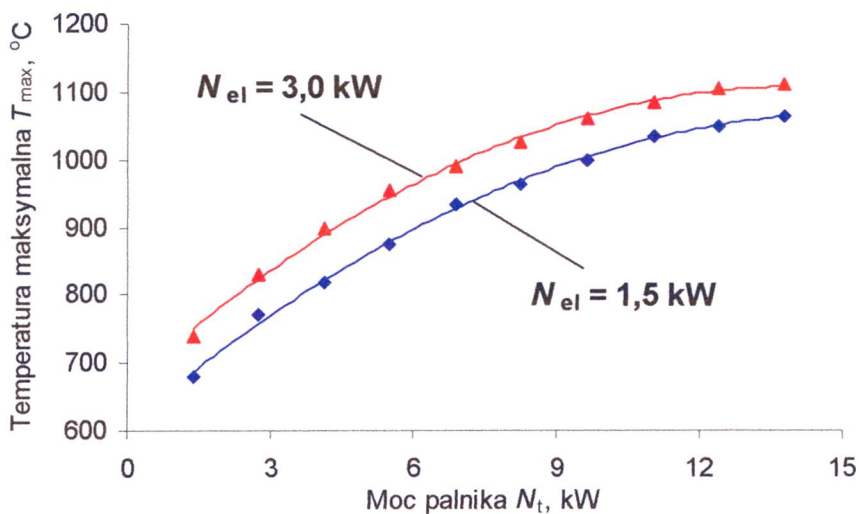
Rys. 10.11. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  i mocy cieplnej  $N_t$  plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego na *umowną długość płomienia pyłowego*  $L_{500}$  (węgiel brunatny)

## 10.5. Rozkłady temperatury w płomieniu pyłowym – plazmowy palnik pyłowy typu strumieniowego

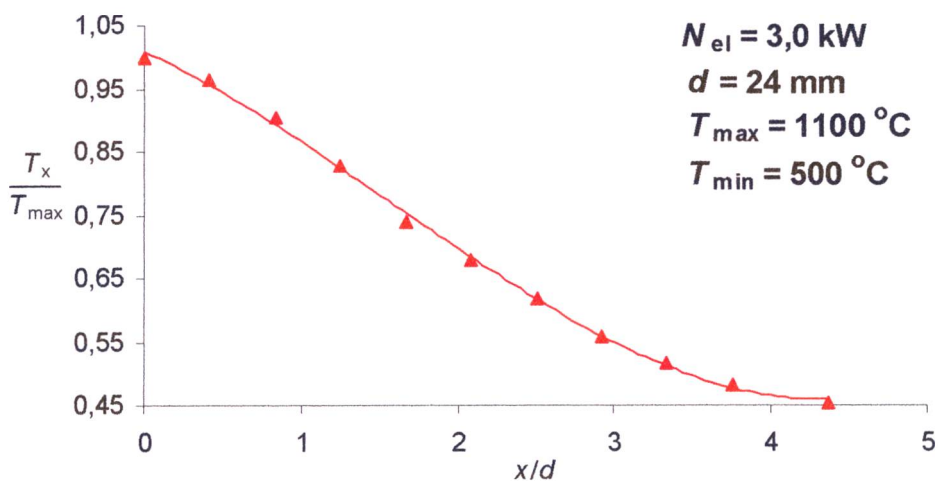
Wyniki pomiarów wpływu mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  i mocy cieplnej palnika  $N_t$  na temperaturę maksymalną płomienia pyłowego z plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego przedstawiono na rysunkach 10.12 i 10.13. Rozkład temperatury płomienia pyłowego w przekroju wzdłużnym dla użytych w badaniach pyłów węgla kamiennego i brunatnego przedstawiono odpowiednio na rysunku 10.14 oraz 10.15.



Rys. 10.12. Wpływ mocy cieplnej palnika  $N_t$  typu strumieniowego i mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na temperaturę maksymalną płomienia pyłowego (węgiel kamienny)

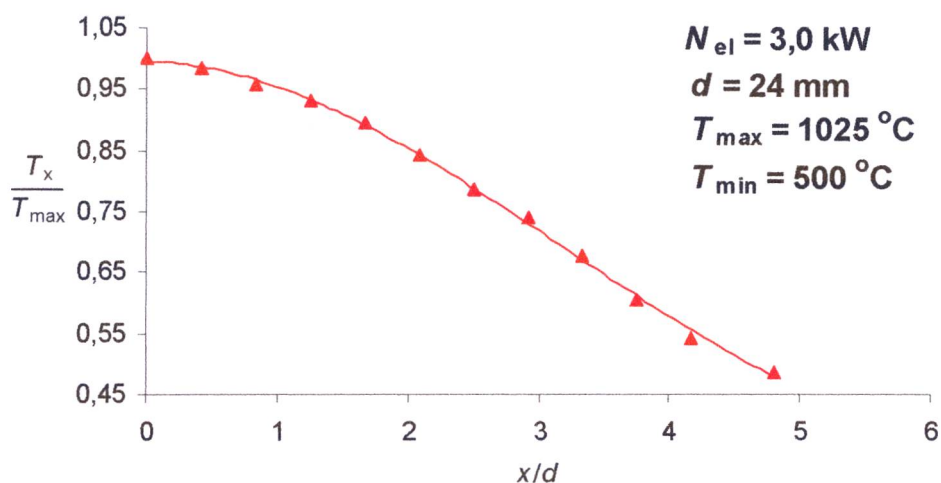


Rys. 10.13. Wpływ mocy cieplnej palnika  $N_t$  typu strumieniowego i mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na temperaturę maksymalną płomienia pyłowego (węgiel brunatny)



Rys. 10.14. Rozkład temperatury płomienia pyłowego z plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego wzdłuż osi (węgiel kamienny,  $q_{mw} = 1,5$  kg/h)





Rys. 10.15. Rozkład temperatury płomienia pyłowego z plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego wzdłuż osi (węgiel brunatny,  $q_{mw} = 1,5 \text{ kg/h}$ )

## 10.6. Analiza wyników

W tabeli 10.1 zebrano uzyskane wyniki pomiarów z przeprowadzonych badań z zastosowaniem plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego i strumieniowego wykonanych dla obu typów węgla.

Tabela 10.1

Maksymalne parametry płomienia dla przebadanych paliw

|                       | Oznaczenie                                 | Jednostka | Węgiel kamienny |      | Węgiel brunatny |       |
|-----------------------|--------------------------------------------|-----------|-----------------|------|-----------------|-------|
| Moc plazmotronu       | $N_{el}$                                   | kW        | 1,5             | 3,0  | 1,5             | 3,0   |
| Moc palnika           | $N_t$                                      | kW        | 17,6            |      | 13,8            |       |
|                       | Plazmowy palnik pyłowy typu cyklonowego    |           |                 |      |                 |       |
| Temperatura płomienia | $T_{max}$                                  | °C        | 1060            | 1200 | 1030            | 1120  |
| Długość płomienia     | $L_{500}/d$                                | -         | 6,88            | 8,75 | 10,29           | 11,67 |
|                       | Plazmowy palnik pyłowy typu strumieniowego |           |                 |      |                 |       |
| Temperatura płomienia | $T_{max}$                                  | °C        | 1090            | 1190 | 1065            | 1110  |
| Długość płomienia     | $L_{500}/d$                                | -         | 5,92            | 6,67 | 6,88            | 7,63  |

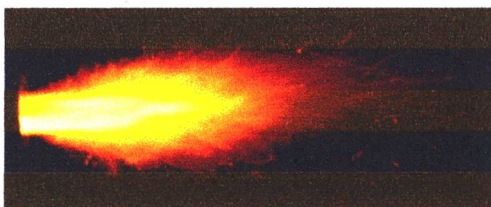
Z wyników przedstawionych w tabeli wynika, że rodzaj plazmowego palnika pyłowego nie ma większego wpływu na temperaturę maksymalną płomienia pyłowego na wylocie z palnika (Tab. 10.1).

Rodzaj palnika i moc elektryczna plazmotronu  $N_{el}$  wpływają jednak na długość płomienia pyłowego, płomień z plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego jest

krótszy od płomienia z palnika typu cyklonowego. Związane to jest prawdopodobnie z krótszym czasem przebywania cząstek węglowych wewnątrz palnika i mniejszym stopniem wypalenia paliwa. Wzrost mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  dla obydwu typów plazmowego palnika pyłowego powoduje niewielkie wydłużenie się płomienia (Tab. 10.1).

Uzupełnieniem do przedstawionych wyników pomiarów płomieni są zdjęcia płomieni wykonanych dla czterech paliw stosowanych w badaniach (Rys. 10.9).

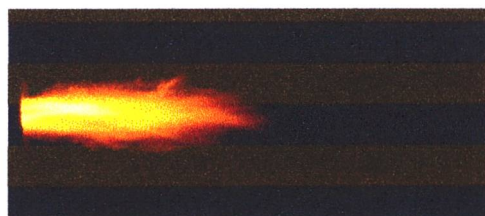
a) węgiel brunatny



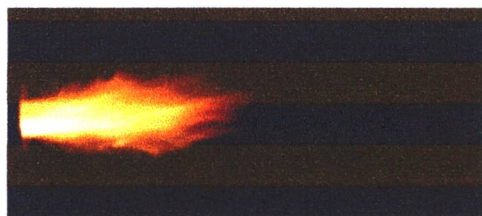
b) pył drzewny



c) węgiel kamienny

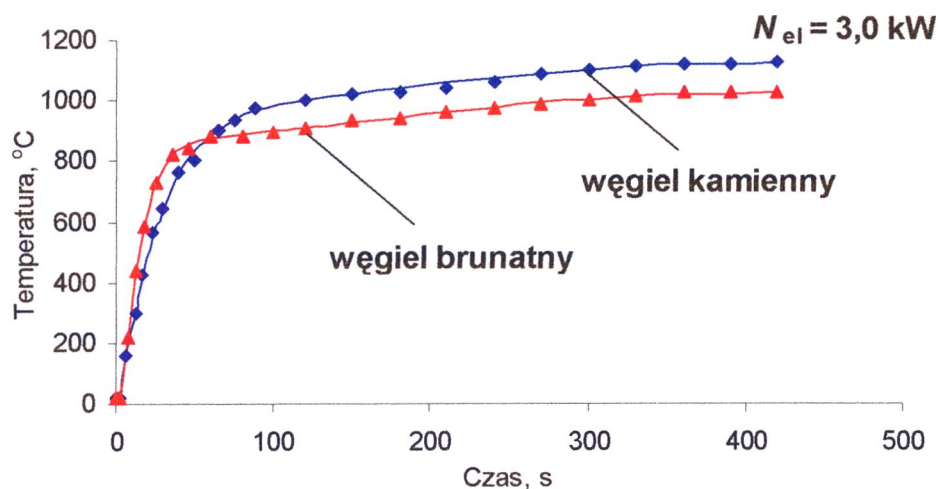


d) łupek powęglowy+węgiel kamienny (50/50)



Rys. 10.9. Zdjęcia płomieni badanych paliw

Z eksploatacyjnego punktu widzenia istotny jest czas zadziałania plazmowego palnika rozpałkowego, ten parametr musi być bowiem uwzględniony w algorytmie rozruchowym kotła. Na rysunku 10.10 pokazano historię zmian temperatury płomienia za palnikiem plazmowym przy jego zasilaniu pyłem węgla brunatnego i kamiennego. Stałą czasową uruchamiania plazmowego palnika pyłowego ocenia się na  $30 \div 50$  s (Rys. 10.10).



Rys. 10.10. Dynamika przyrostu temperatury płomienia pyłowego na wylocie z plazmowego palnika pyłowego ze stanu zimnego ( $q_{mw} = 1,5$  kg/h)



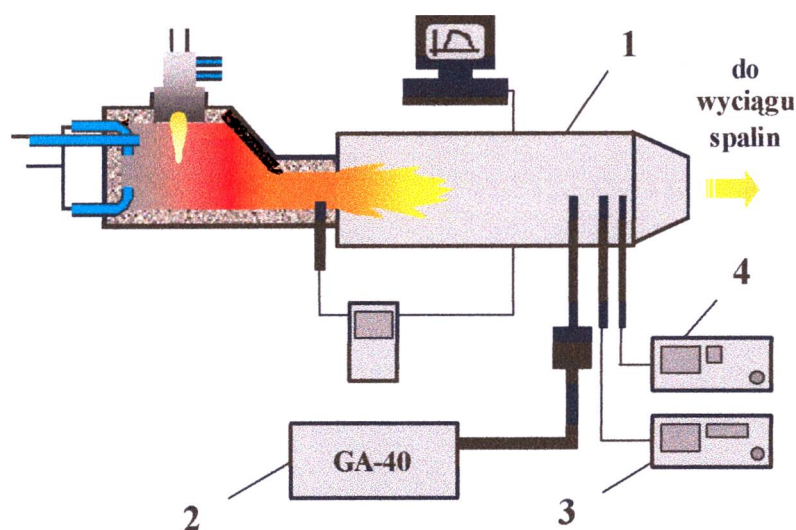
## 11. Emisja zanieczyszczeń z plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego i strumieniowego

Podstawowym aspektem działania urządzeń technicznych, w których występuje proces spalania, jest zapewnienie odpowiedniej jakości spalania. Rozpłukowe palniki pyłowe muszą być zatem tak skonstruowane żeby zapewnić, nie tylko odpowiednią wymianę ciepła w komorze paleniskowej, ale również minimalną emisję zanieczyszczeń do atmosfery.

Celem tej części pracy było określenie poziomu emisji podstawowych zanieczyszczeń ( $NO$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ) z plazmowych palników pyłowych oraz stopnia wypalenia paliwa  $B_c$ . W badaniach użyto pyłu węgla brunatnego i kamiennego, których właściwości zawarto w tabeli 6.2. Wyniki pomiarów udziału  $NO$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  w spalinach przedstawiono na rysunkach 11.2 ÷ 11.7. Stopień wypalenia pierwiastka węgla pokazano na rysunku 11.8.

### 11.1. Opis stanowiska badawczego do badań emisji zanieczyszczeń płomieni pyłowych stabilizowanych plazmą

Badania nad wielkością emisji zanieczyszczeń z płomieni pyłowych stabilizowanych plazmą przeprowadzono również na stanowisku badawczym pokazanym na rysunku 6.7, przy czym do układu dołączono komorę spalania (1) z otworami na sondę do poboru spalin do analizatora spalin *GA-40* (2) oraz *Infralytów*: *I206* do pomiaru  $CO$  (3) i *I206* do pomiaru  $CO_2$  (4). Schemat przygotowanego stanowiska do badań przedstawiono na rysunku 11.1.



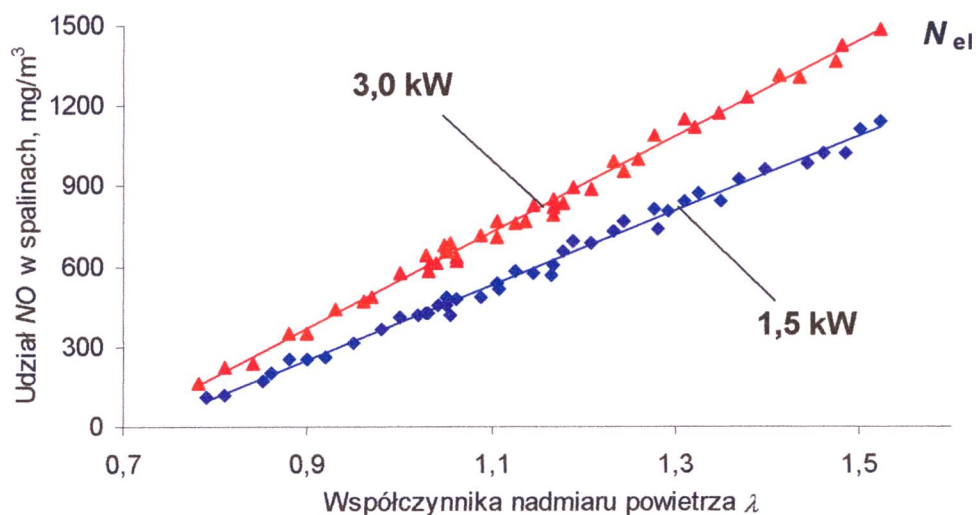
Rys. 11.1. Stanowisko badawcze do pomiarów udziałów zanieczyszczeń w spalinach z płomieni pyłowych stabilizowanych plazmą:

1 – komora spalania, 2 – analizator spalin *GA-40*, 3 – *Infralyt* do pomiaru  $CO$ , 4 – *Infralyt* do pomiaru  $CO_2$

Pomiary wielkości emisji zanieczyszczeń ( $NO$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ) prowadzono w ten sposób, że dla ustalonych strumieni przepływu paliwa i powietrza oraz danej mocy plazmotronu pobierano, na wylocie z komory spalania (1), próbkę spalin do analizatora (2) i rejestrowano udział  $NO$  w spalinach. W tym samym czasie dokonywano również pomiaru emisji  $CO$  i  $CO_2$  za pomocą *Infralytów* (3) i (4). Zmieniając moc elektryczną plazmotronu  $N_{el}$  i strumień objętości powietrza, uzyskano charakterystyki przedstawiające wpływ mocy plazmotronu oraz współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na poziom emisji zanieczyszczeń z plazmowego palnika pyłowego (PPP) typu cyklonowego.

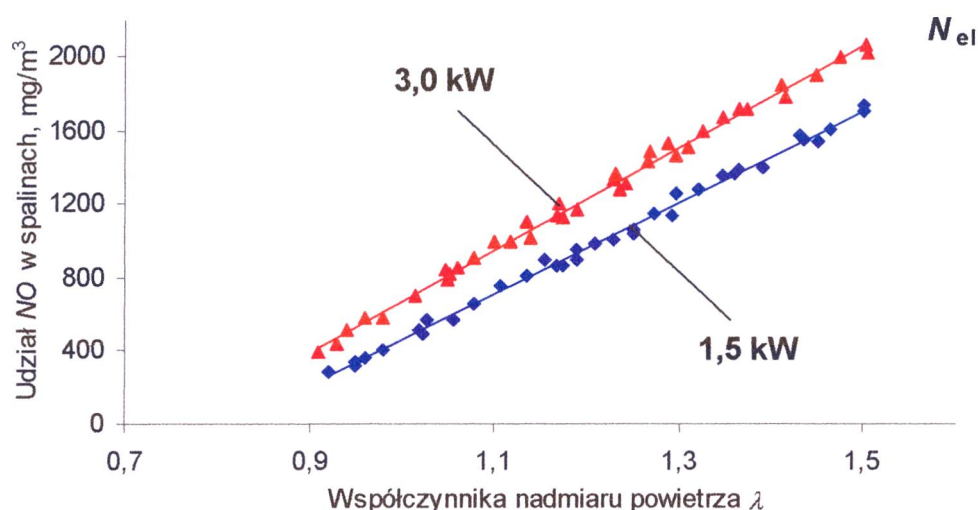
## 11.2. Emisja tlenku azotu $NO$

W przypadku spalania węgla w paleniskach pyłowych źródłem  $NO_x$  są przede wszystkim związki azotowe zawarte w węglu (*azot paliwowy*) [109]. Udział termicznych tlenków azotu w całkowitej emisji  $NO_x$  jest od 5 ÷ 10%, zależnie od rodzaju węgla i paleniska [110]. Udział *szybkich*  $NO_x$  jest pomijalny podczas spalania węgla. Ze względu na wysoką temperaturę plazmy ( $T_p = 10 \cdot 10^3$  °C) proporcje *paliwowego* i *termicznego*  $NO_x$  w spalinach z plazmowego palnika pyłowego mogą ulec znacznej zmianie. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 11.2 i 11.3.



Rys. 11.2. Zależność udziału  $NO$  (w przeliczeniu na 6%  $O_2$ ) w spalinach od współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  z plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (węgiel brunatny,  $q_{mw} = 1,5$  kg/h)





Rys. 11.3. Zależność udziału  $NO$  (w przeliczeniu na 6%  $O_2$ ) w spalinach od współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  z plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (węgiel kamienny,  $q_{mw} = 1,5$  kg/h)

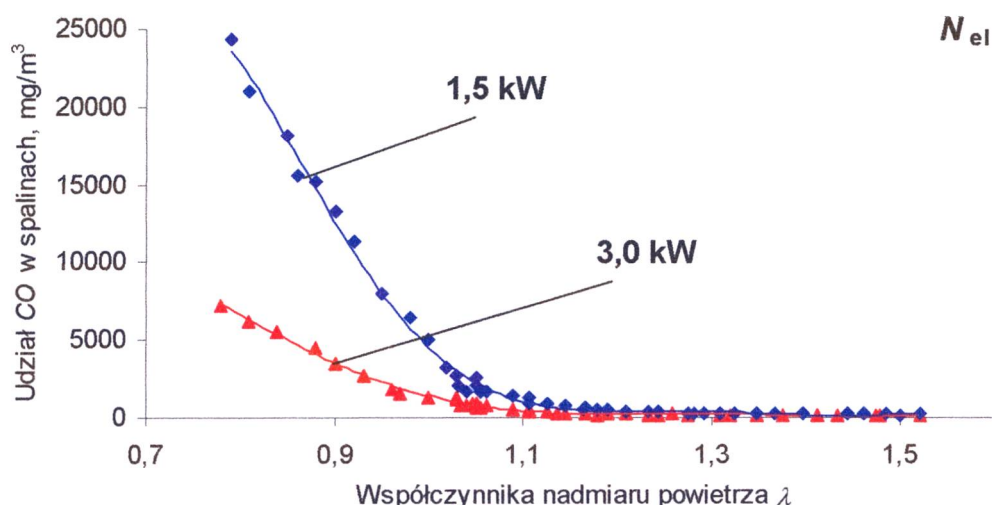
Wyniki pomiarów pokazują niemal liniową zależność udziału  $NO$  w spalinach od współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ , a wartość  $[NO]$  sięga  $2000$  mg/m<sup>3</sup> dla  $\lambda = 1,5$ . Wskazuje to na generację tlenków azotu w wyniku kontaktu powietrza z plazmą. Większa emisja  $NO$  powstających podczas spalania pyłu węgla kamiennego, niż podczas spalania pyłu węgla brunatnego, wynikać może również z większej zawartości azotu w węglu kamiennym (1,05%) niż w węglu brunatnym (0,56%) i wyższej temperatury spalania (Rys. 10.4 i 10.5).

Rozpatrując wyniki wykonanych pomiarów należy brać pod uwagę fakt, że spalanie w plazmowym palniku pyłowym będzie odbywać się z niewielkim niedomiarem powietrza, kiedy udział  $NO$  w spalinach (Rys. 11.2 i 11.3) małał do poziomu typowego dla kotłów pyłowych ( $300 \div 400$  mg/m<sup>3</sup> dla węgla brunatnego i  $400 \div 600$  mg/m<sup>3</sup> dla węgla kamiennego) [109]. Należy ponadto wziąć pod uwagę, że plazmowy palnik pyłowy jest tylko częścią palnika rozpałkowego. Całkowita moc palnika jest ponad dziesięć razy większa od plazmowego palnika pyłowego, zatem udział  $NO$  w spalinach zmaleje na skutek rozcieńczenia.

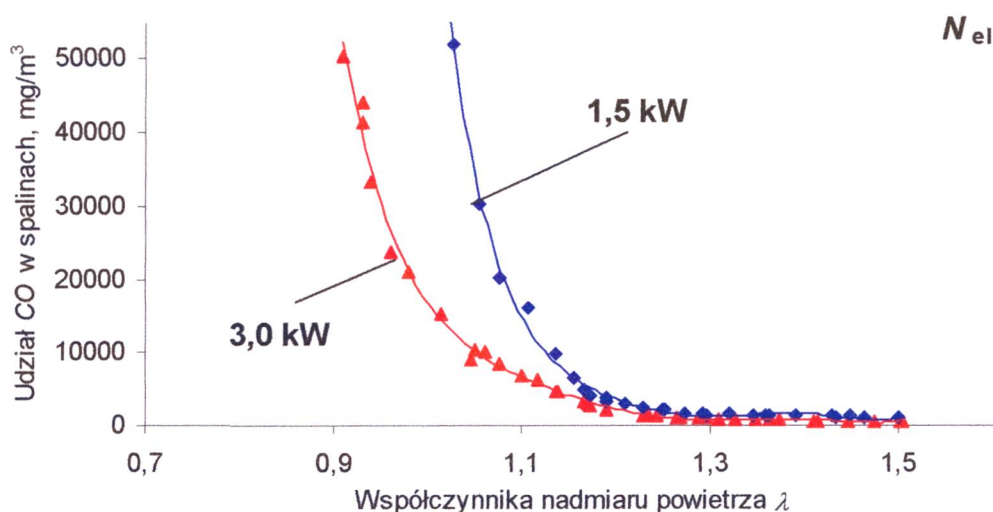
### 11.3. Emisja tlenku węgla $CO$

Tlenek węgla  $CO$  powstaje w wyniku niezupełnego spalania paliw kopalnych. Jego emisja jest ważna między innymi z powodów ekologicznych i energetycznych, ponieważ jest gazem silnie trującym, a jego obecność w spalinach obniża sprawność spalania.

Na rysunkach 11.4 i 11.5 pokazano zależność udziału  $CO$  w spalinach z plazmowego palnika pyłowego w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza dla dwóch wartości mocy plazmotronu.



Rys. 11.4. Udział tlenku węgla  $CO$  (dla 6%  $O_2$ ) w spalinach z plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (węgiel brunatny,  $q_{mw} = 1,5$  kg/h)



Rys. 11.5. Udział tlenku węgla  $CO$  (dla 6%  $O_2$ ) w spalinach z plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (węgiel kamienny,  $q_{mw} = 1,5$  kg/h)

Uzyskane wyniki pomiarów pokazują typową zależność udziału  $CO$  w spalinach od współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  – przy niedomiarze powietrza udział tlenku węgla gwałtownie rośnie. Maksymalne udziały  $CO$  w spalinach są duże – sięgają 5%, trzeba jednak pamiętać, że laboratoryjny plazmowy palnik pyłowy miał zbyt krótki czas przebywania, żeby tlenek węgla mógł się dopalić. Mniejszą emisję tlenku węgla dla większej mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  należy tłumaczyć wyższą temperaturą spalania, która zapewnia większy stopień wypalenia.

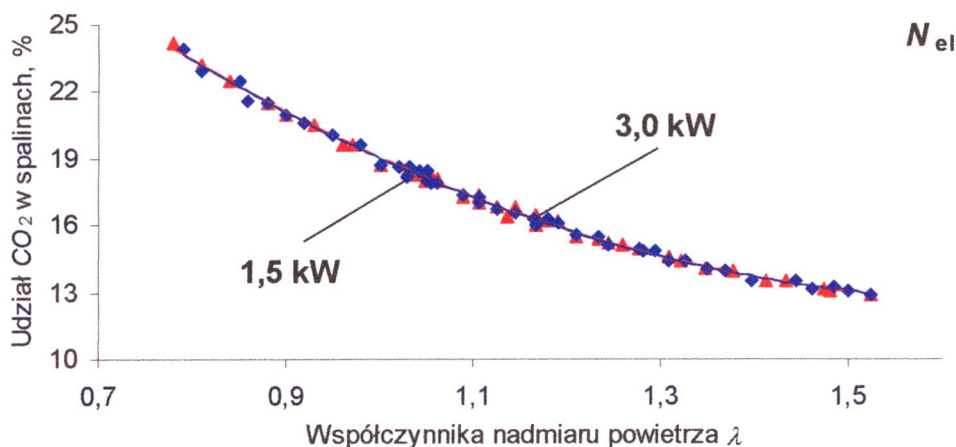
Większą emisję  $CO$  podczas spalania pyłu węgla kamiennego należy tłumaczyć mniejszą zawartością części lotnych w węglu kamiennym ( $V^a = 24,95\%$ ) w stosunku do węgla brunatnego ( $V^a = 40,54\%$ ).

Stosunkowo duża emisja  $CO$  to rezultat niewielkiej mocy cieplnej plazmowego palnika pyłowego, krótkiego czasu przebywania w palniku i „zimnego” otoczenia. Dopiero przejście od skali laboratoryjnej do technicznej może spowodować wyraźne zmniejszenie emisji  $CO$ .

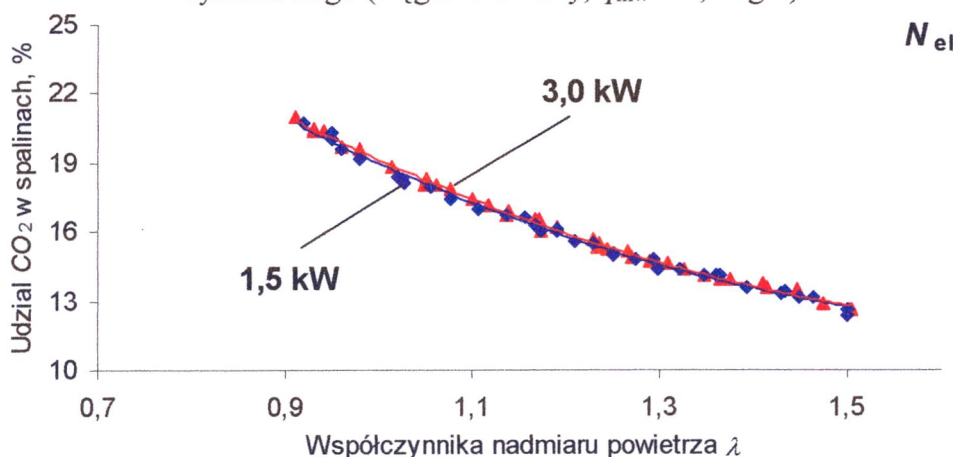
#### 11.4. Emisja dwutlenku węgla $CO_2$

Powstający podczas procesu spalania paliw kopalnych dwutlenek węgla  $CO_2$ , choć nie jest gazem trującym, to jego obecność w środowisku naturalnym nie jest obojętna. Zwiększenie udziału  $CO_2$  w atmosferze przyczynia się do wzrostu efektu cieplarnianego.

Wielkość emisji  $CO_2$  z plazmowego palnika pyłowego w zależności od mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  przedstawiono na rysunkach 11.6 i 11.7.



Rys. 11.6. Udział dwutlenku węgla  $CO_2$  w spalinach z plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (węgiel brunatny,  $q_{mw} = 1,5 \text{ kg/h}$ )



Rys. 11.7. Udział dwutlenku węgla  $CO_2$  w spalinach z plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego (węgiel kamienny,  $q_{mw} = 1,5 \text{ kg/h}$ )

Z przedstawionych wyników pomiarów widać, że moc elektryczna plazmotronu  $N_{el}$  nie ma wpływu na udział  $CO_2$  w spalinach, jego poziom zdeterminowany jest przez współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$ . Również zmiany udziału  $CO$  nie są istotne dla  $CO_2$ , ponieważ udział  $CO$  jest o rząd mniejszy od udziału  $CO_2$  w spalinach.

### 11.5. Stopień wypalenia

Ważnym zagadnieniem w przypadku uruchamiania kotłów pyłowych z użyciem plazmowych palników pyłowych jest uzyskany stopień wypalenia węgla  $B_c$ . Badania efektywności spalania przeprowadzono dla plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego w zależności od mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$ . W badaniach użyto pyłu węgla brunatnego i kamiennego ( $d_o < 80 \mu m$ ).

Stopień wypalenia  $B_c$  wyznaczono zgodnie z procedurą stosowaną w badaniach laboratoryjnych z zastosowaniem pieca opadowego [111]. Według tej procedury stopień wypalenia  $B_c$  określa się z udziału popiołu w węglu w stanie suchym  $A_o^d$  i w pozostałości koksowej za paleniskiem  $A_1^d$  z następującej formuły:

$$B_c = \left( 1 - \frac{A_o^d}{100 - A_o^d} \cdot \frac{100 - A_1^d}{A_1^d} \right) \cdot 100 \quad (11.1)$$

W celu wyznaczenia wartości  $B_c$  ustalono strumień masy pyłu węglowego do plazmowego palnika pyłowego ( $q_{mw} = 1,5 \text{ kg/h}$ ) oraz strumień objętości powietrza wtórnego i pierwotnego dla przyjętego współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  ( $\lambda = 1,05$ ) i przy określonej mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  utrzymywano działanie palnika aż do ustalenia się warunków pracy. Następnie do separatora cyklonowego dołączono zbiornik do pobrania koksu, który poddano analizie technicznej i elementarnej. W ten sposób zbadano wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na stopień wypalenia  $B_c$  pyłu węglowego w plazmowym palniku pyłowym.

W tabelach 11.1 i 11.2 przedstawiono wyniki analizy technicznej i elementarnej dla użytych w badaniach węgli: brunatnego i kamiennego.



Tablica 11.1

Analiza techniczna i elementarna węgla w popiele lotnym ze spalania węgla brunatnego

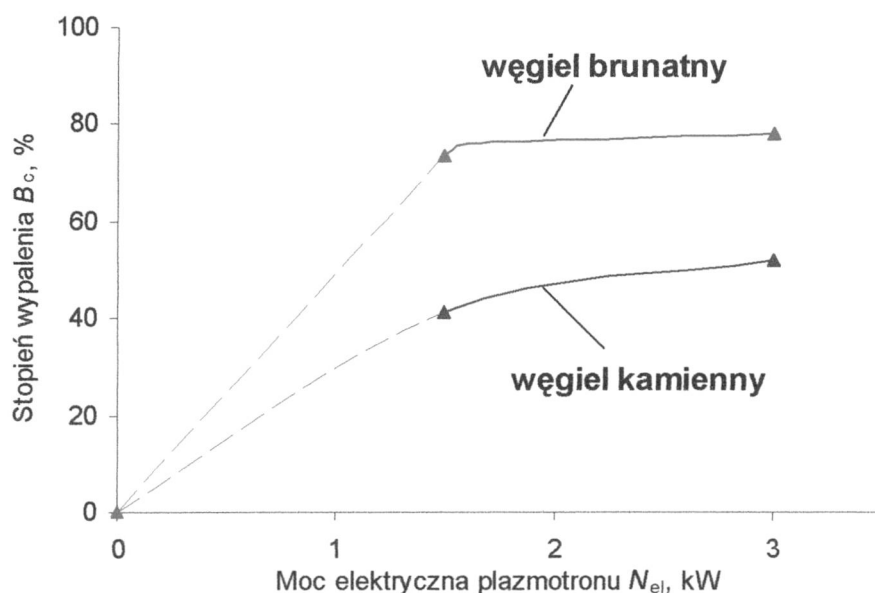
|                 |         |        | Węgiel brunatny                      |        |        |
|-----------------|---------|--------|--------------------------------------|--------|--------|
|                 |         |        | Moc elektryczna plazmotronu $N_{el}$ |        |        |
|                 |         |        | 0 kW                                 | 1,5 kW | 3,0 kW |
|                 |         |        | Analiza techniczna                   |        |        |
| Wartość opałowa | $Q_1^a$ | MJ/kg  | 19,82                                | 13,46  | 12,53  |
| Ciepło spalania | $Q_s^a$ | MJ/kg  | 21,0                                 | 13,92  | 12,87  |
| Wilgoć          | $W^a$   | %      | 11,9                                 | 2,23   | 2,16   |
| Części lotne    | $V^a$   | %      | 40,54                                | 20,56  | 12,78  |
| Popiół          | $A^a$   | %      | 19,46                                | 50,56  | 55,27  |
| Popiół          | $A^d$   | %      | 22,09                                | 51,72  | 56,49  |
|                 |         |        | Analiza elementarna                  |        |        |
| Węgiel          | $C^a$   | % mas. | 49,55                                | 35,20  | 30,54  |
| Wodór           | $H^a$   | % mas. | 4,10                                 | 1,84   | 1,32   |
| Azot            | $N^a$   | % mas. | 0,56                                 | 0,60   | 0,61   |
| Siarka          | $S^a$   | % mas. | 0,54                                 | 0,37   | 0,31   |
| Tlen            | $O^a$   | % mas. | 13,89                                | 9,20   | 9,79   |

Tablica 11.2

Analiza techniczna i elementarna węgla w popiele lotnym ze spalania węgla kamiennego

|                 |         |        | Węgiel kamienny                      |        |        |
|-----------------|---------|--------|--------------------------------------|--------|--------|
|                 |         |        | Moc elektryczna plazmotronu $N_{el}$ |        |        |
|                 |         |        | 0 kW                                 | 1,5 kW | 3,0 kW |
|                 |         |        | Analiza techniczna                   |        |        |
| Wartość opałowa | $Q_1^a$ | MJ/kg  | 25,33                                | 20,51  | 18,74  |
| Ciepło spalania | $Q_s^a$ | MJ/kg  | 26,19                                | 20,89  | 19,04  |
| Wilgoć          | $W^a$   | %      | 1,60                                 | 1,50   | 0,73   |
| Części lotne    | $V^a$   | %      | 24,95                                | 9,63   | 7,39   |
| Popiół          | $A^a$   | %      | 24,64                                | 35,74  | 40,86  |
| Popiół          | $A^d$   | %      | 25,04                                | 36,29  | 41,16  |
|                 |         |        | Analiza elementarna                  |        |        |
| Węgiel          | $C^a$   | % mas. | 60,79                                | 55,24  | 52,65  |
| Wodór           | $H^a$   | % mas. | 3,78                                 | 1,55   | 1,26   |
| Azot            | $N^a$   | % mas. | 1,05                                 | 1,08   | 1,10   |
| Siarka          | $S^a$   | % mas. | 0,51                                 | 0,46   | 0,43   |
| Tlen            | $O^a$   | % mas. | 7,63                                 | 4,43   | 2,97   |

Na rysunku 11.8 przedstawiono wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na stopień wypalenia węgla  $B_c$  dla węgla kamiennego i brunatnego.



Rys. 11.8. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na stopień wypalenia węgla  $B_c$

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że moc elektryczna plazmotronu  $N_{el}$  ma niewielki wpływ na stopień wypalenia pierwiastka węgla  $B_c$  (Rys. 11.8) oraz spalanie części lotnych (Tab. 11.1 i 11.2) w plazmowym palniku pyłowym. Wynika to z szybszego rozkładu termicznego pyłu węglowego w większym strumieniu cieplnym plazmy wraz ze zwiększaniem mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$ . Większy stopień wypalenia pierwiastka węgla w węglu brunatnym, w stosunku do węgla kamiennego, należy tłumaczyć znacznie większym udziałem części lotnych w węglu brunatnym i większą reaktywnością koksu węgla brunatnego.

Stosunkowo duży niedopał łatwo było przewidzieć biorąc pod uwagę niesprzyjające dla płomienia pyłowego zimne otoczenie, w którym szybko następowało gaśnięcie cząstek koksu. Ponadto w warunkach laboratoryjnych czas przebywania cząstek węgla w palniku był krótki ( $t_{res} = 50 \div 800$  ms), w tym przypadku  $t_{res} = 120$  ms. Stopień wypalenia na pewno poprawi się, jeżeli spalanie będzie miało miejsce w rzeczywistym palniku, w którym czas przebywania znacznie się zwiększy.

## 11.6. Podsumowanie

Zagadnienie emisji zanieczyszczeń z plazmowych palników pyłowych jest ważne dla procesu spalania paliw stałych. Otrzymane wyniki pomiarów emisji  $CO$ ,  $NO$  oraz

stopnia wypalenia  $B_c$  można uznać za niezbyt zadawalające, ale należy zwrócić uwagę na dwa istotne czynniki, krótki czas przebywania cząstek węglowych w badanym palniku (niewystarczający dla przebiegu zupełnego i całkowitego spalania pyłu węglowego) oraz zimne otoczenie płomienia sprzyjające wzrostowi stopnia niedopału.

Pewien wpływ na poziom emisji ma również moc elektryczna plazmotronu, której wzrost zwiększa strumień ciepła doprowadzanego do palnika z plazmą, co zmniejsza udział  $CO$  w spalinach dla mniejszego nadmiaru współczynnika powietrza, ale powoduje jednocześnie pewien wzrost udziału  $NO$  w spalinach.

## 12. Modelowanie numeryczne działania plazmowego palnika pyłowego

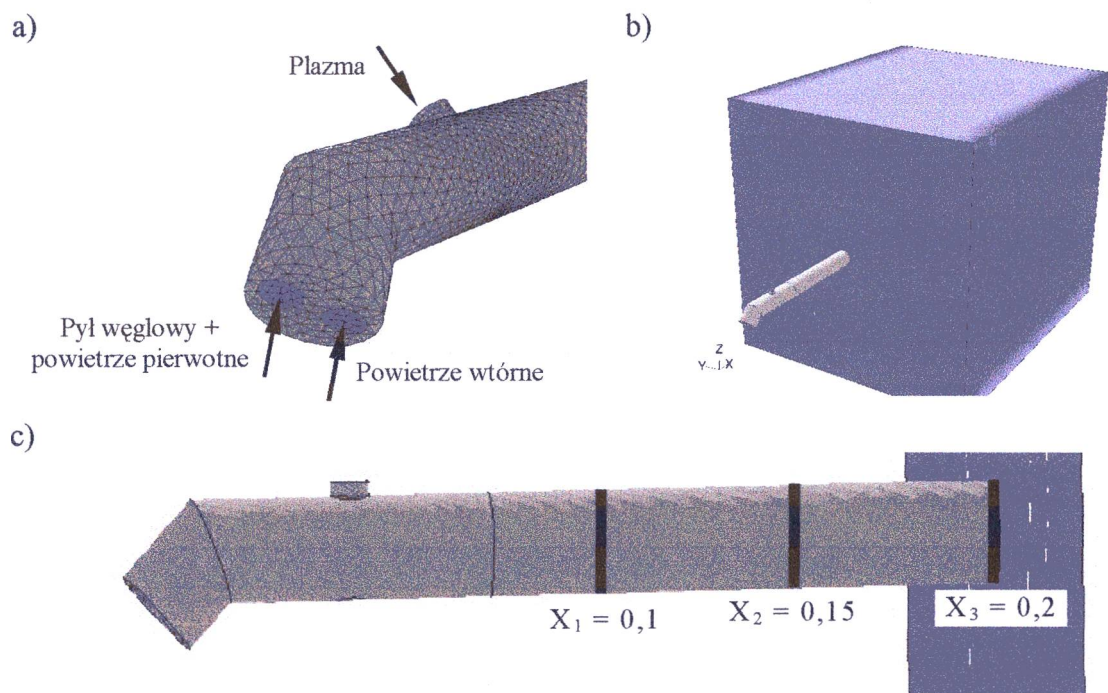
Modelowanie matematyczne płomieni pyłowych za palnikiem jest szczególnie trudnym i wyzywającym zadaniem, znacznie trudniejszym niż modelowanie procesów ciepłno – przepływowych w palenisku pyłowym. Symulując numerycznie płomienie nie można pominąć lub zbyt uproszczyć kinetyki chemicznej spalania, jak się to robi w przypadku modelowania palenisk pyłowych [112]. Problem ten jest szczególnie trudny w przypadku palników pyłowych, w których krytyczna jest tzw. „bliska” aerodynamika spalania decydująca o zakresie stabilności palnika, a nawet o emisji  $NO_x$  [113]. Mimo trudności z określeniem turbulentnej prędkości spalania podejmowane są nieliczne próby wykorzystania metod numerycznych do symulacji „bliskiej” aerodynamiki spalania w pobliżu wylotu palnika w celu określenia zakresu stabilnej pracy palników oraz emisji  $NO_x$  [114].

Cel tego rozdziału jest bardzo zbliżony, ponieważ zadaniem jest stwierdzenie, jak obecność plazmy wpływa na takie charakterystyki palnika, jak: zakres pracy, stopień wypalenia i temperatura płomienia. Na podstawie wyników badań doświadczalnych przyjęto w modelu matematycznym założenie, że plazma ma tylko termiczne oddziaływanie na mieszaninę pyłowo – powietrzną. Do symulacji numerycznej wybrano plazmowy palnik pyłowy typu strumieniowego, ze względu na prostszą konstrukcję. Ta część pracy została wykonana przy współpracy z Zakładem Procesów Ciepłych Instytutu Energetyki w Warszawie.

### 12.1. Numeryczna reprezentacja geometrii plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego

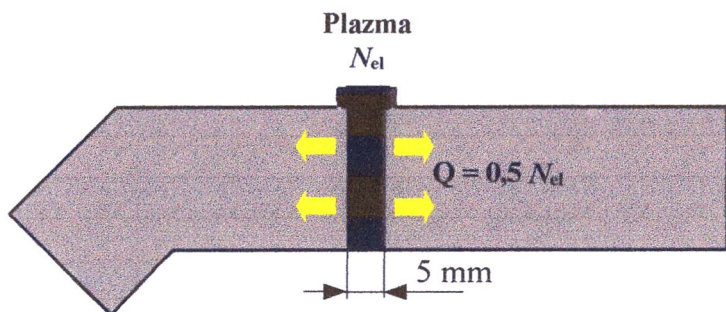
W celu symulacji numerycznej działania plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego wykorzystano wiodący na rynku programów *CFD* (ang. *Computer Fluid Dynamics*) kod *FLUENT* w najnowszej wersji 6.02. W modelu założono, że obszar obliczeniowy obejmuje fragment palnika z częścią napływową, część wypływową plazmotronu oraz fragment przestrzeni za wylotem z dyszy palnika (Rys. 12.1). Symulacja została wykonana w 3D, siatka numeryczna wynosiła 45 tysięcy celek.





Rys. 12.1. Model numeryczny plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego: siatka numeryczna (a), kontrolne przekroje poprzeczne (b), obszar obliczeniowy (c)

Na powierzchniach ograniczających tę przestrzeń przyjęto ciśnieniowy warunek brzegowy, aby odwzorować typowy wypływ do przestrzeni otwartej. Obszar plazmy zasymulowano jako walec o średnicy 5 mm i długości odpowiadającej średnicy kanału palnika (Rys. 12.2). W obszarze tym zainicjowano źródło ciepła odpowiadające mocy elektrycznej plazmotronu z uwzględnieniem 50% strat na chłodzenie. Ustalono także maksymalne dopuszczalne temperatury i stałą wartość strumienia przepływu argonu.



Rys. 12.2. Model do symulacji oddziaływania cieplnego plazmy na strumień mieszanki pyłowo – powietrznej

Założono, że ścianki palnika nie wymieniają ciepła z otoczeniem (warunek adiabatyczny). Przyjęto, że mieszanka pyłowo – powietrzna wpływa do palnika kanałem o średnicy 8 mm ( $q_{mpp} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Powietrze wtórne również podawane było kanałem o średnicy 8 mm. Temperatura początkowa czynników na wlocie do plazmowego palnika pyłowego wynosiła 300 K.

## 12.2. Strategia modelowania

Przepływ gazu i cząstek modelowano osobno, odpowiednio w nieruchomym układzie współrzędnych *Eulera* dla fazy gazowej i związanym z poruszającą się cząstką w układzie *Lagrange'a* dla fazy stałej. Oddziaływanie cząstek na fazę gazową obliczano metodą *PSIC (Particle Source in Cell)* przez uwzględnienie dodatkowych członów źródłowych w równaniach fazy gazowej. Oddziaływanie fazy gazowej na cząstki zawarto w równaniu ruchu cząstek w postaci siły oporu. W modelu uwzględniono również inne oddziaływania, jak nagrzewanie cząstek od otaczającego je gazu oraz heterogeniczne reakcje chemiczne, w których biorą udział składniki fazy gazowej [115].

Do wymiany ciepła przez promieniowanie zastosowano sub – model *DO (Discrete Ordinates)*, który uwzględnia również promieniowanie cząstek fazy dyskretniej. Do obliczeń emisyjności ośrodka gazowego użyto sub – modelu *WSGGM cell based*, który oblicza emisyjność na podstawie koncentracji  $CO_2$  i  $H_2O$  w objętości kontrolnej.

W pełnym modelu przepływu dwufazowego, po wstępnym „wyiterowaniu” pola przepływu, temperatur i koncentracji składników fazy gazowej obliczano trajektorie i spalanie cząstek pyłu poruszających się w obliczonym polu przepływu gazu. Następnie powtarzano obliczenia dla fazy gazowej z uwzględnieniem źródeł od fazy stałej. Powyższy cykl obliczeń powtarzano, aż do uzyskania rozwiązania zbieżnego.

### 12.2.1. Obliczenia dla fazy stałej

Pył węglowy podzielono na szereg frakcji (Tab. 12.1) o jednakowych początkowych średnicach cząstek i wprowadzano do przepływu poprzez każdą celkę na powierzchni wlotu z dyszy pyłowo – powietrznej palnika.

Tabela 12.1

Podział frakcji pyłu węglowego dla modelowania numerycznego

| Rozmiar sita, $\mu m$ | Pozostałość na sicie | Udział frakcji |
|-----------------------|----------------------|----------------|
| R 200                 | 3                    | 0,03           |
| R 125                 | 11                   | 0,08           |
| R 90                  | 24                   | 0,13           |
| R 63                  | 45                   | 0,21           |
| R 32                  | 80                   | 0,35           |
| R 15                  | 92                   | 0,12           |
| R 5                   | 100                  | 0,08           |

Zachowanie się danej frakcji pyłu wypływającej z danego przekroju wyznaczone jest na podstawie śledzenia cząstki reprezentatywnej. W obliczeniach uwzględniono stochastyczną dyspersję cząstek na skutek oddziaływania turbulencji gazu, co wymagało śledzenia trajektorii kilkudziesięciu cząstek z jednej frakcji wprowadzonej do obszaru obliczeniowego.

Tory cząstek węglowych wyznaczano w wyniku całkowania równań ruchu. W czasie przepływu cząstek przez kolejne objętości kontrolne siatki różnicowej (tej samej co dla obliczeń fazy gazowej) obliczane było ich aktualne położenie, prędkość, masa i entalpia. Różnice masy, pędu i entalpii na wlocie i wylocie objętości kontrolnej stanowiły odpowiednie źródła w równaniach zachowania dla fazy gazowej.

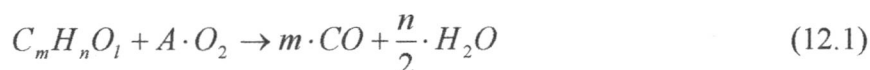
### 12.2.2. Obliczenia dla fazy gazowej

Fazę gazową traktowano jako ciągły, turbulentny, reagujący ośrodek, który opisują lokalne równania bilansowe. Model bazuje na rozwiązaniu układu tych sprzężonych wzajemnie, nieliniowych, równań różniczkowych bilansowych dla:

- trzech składowych pędu,
- masy (poprzez rozwiązanie równania korekcji ciśnienia),
- wielkości charakteryzujących turbulencję przepływu (energia kinetyczna turbulencji i szybkość dyssypacji według modelu  $k-\epsilon$ ),
- entalpii i składników gazowych.

Równania bilansowe sprowadzono do jednakowej postaci (Dyfuzja + Konwekcja = Źródła), do których rozwiązania wykorzystano te same procedury numeryczne. W modelu przyjęto, że faza gazowa składa się z sześciu składników: części lotnych wydzielonych z węgla,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  i  $N_2$ . Przyjęto, że części lotne wydzielone z węgla można przedstawić w postaci zastępczego związku gazowego  $C_mH_nO_l$ . Proces spalania w fazie gazowej zachodził dwustopniowo:

- spalanie części lotnych do  $H_2O$  i  $CO$ :



gdzie:

$$A = \frac{(m-1)}{2} + \frac{n}{4} \quad (12.2)$$

- spalanie  $CO$  do  $CO_2$ :





przy czym obecne w fazie gazowej  $CO$  pochodzi zarówno ze spalania części lotnych, jak i ze spalania koksu.

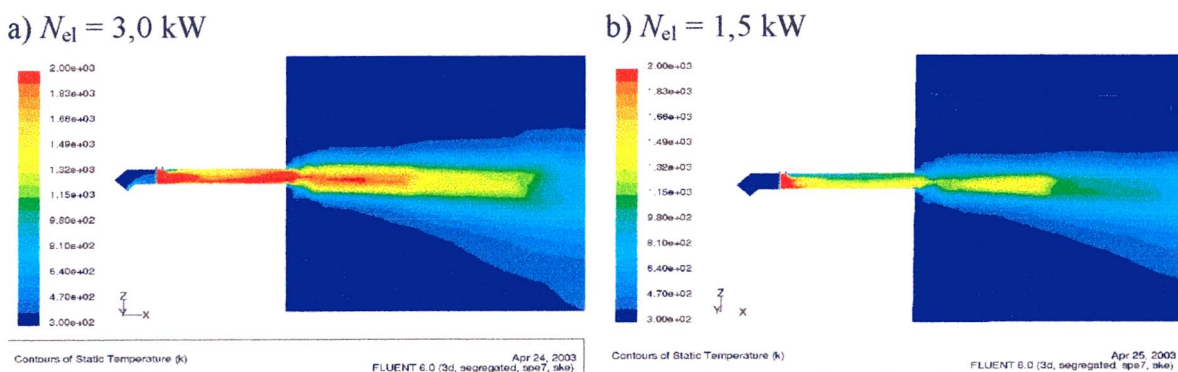
Przyjęto, że wskutek szybkiej pirolizy, ilość wydzielonych części lotnych jest 1,2 razy większa od wartości wynikającej z analizy technicznej węgla. Założono jedno – reakcyjny model odgazowania opisany równaniem *Arrheniusa*. Stałe kinetyczne modelu odgazowania przyjęto z bazy danych *FLUENTA*, współczynnik przedeksponencjalny  $k_0 = 312000 \text{ s}^{-1}$  i energia aktywacji  $E = 7,4 \cdot 10^7 \text{ J/kmol}$ . Założono, że koks utlenia się w reakcji heterogenicznej z  $O_2$  do  $CO$ , które następnie dopala się w fazie gazowej do  $CO_2$ . Szybkość reakcji utleniania koksu określono z modelu kinetyczno – dyfuzyjnego. Użyto następujących stałych: współczynnik dyfuzji  $D = 5 \cdot 10^{-12}$ , energia aktywacji  $E = 7,9 \cdot 10^7 \text{ J/kmol}$ , współczynnik przedeksponencjalny  $k_0 = 0,002 \text{ s}^{-1}$ .

### 12.3. Wyniki modelowania numerycznego

Wyniki obliczeń numerycznych symulacji zapłonu pyłów węgla kamiennego i brunatnego za pomocą plazmy w plazmowym palniku pyłowym typu strumieniowego przedstawiono na rysunkach 12.3 ÷ 12.16.

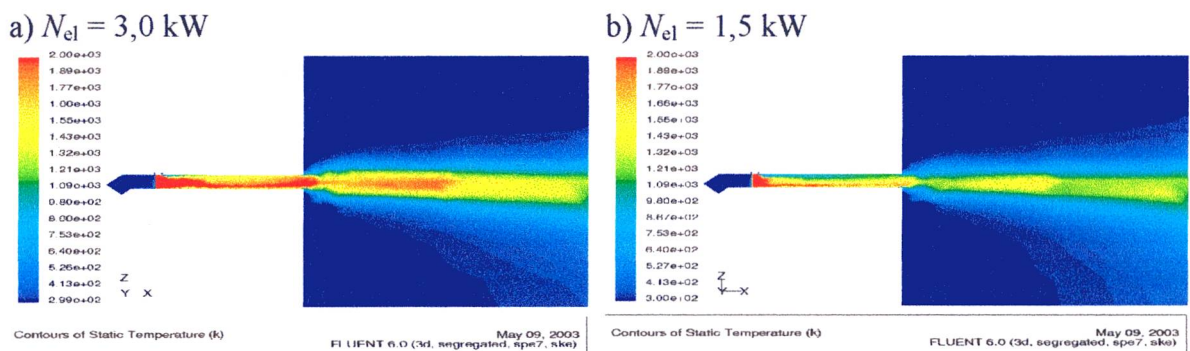
#### 12.3.1. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu $N_{el}$ na cechy płomienia z plazmowego palnika pyłowego

Na rysunkach 12.3 i 12.4 pokazano wpływ  $N_{el}$  na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego oraz temperaturę płomienia pyłowego dla pyłów węgla kamiennego i brunatnego. Wynika z nich, że wzrost mocy elektrycznej  $N_{el}$  powoduje rozszerzenie zakresu pracy *PPP* oraz podwyższenie temperatury płomienia pyłowego.



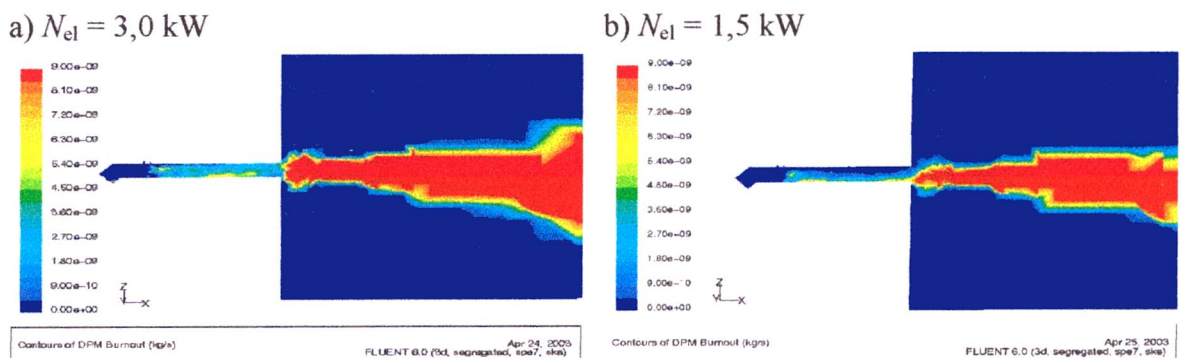
Rys. 12.3. Wpływ mocy elektrycznej  $N_{el}$  na zakres pracy *PPP* i temperaturę płomienia pyłowego (węgiel kamienny,  $q_{mw} = 2,25 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,38$ )



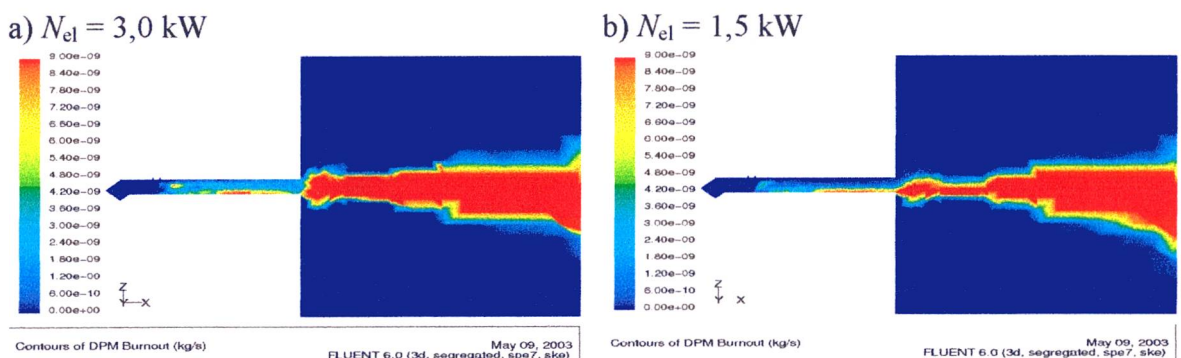


Rys. 12.4. Wpływ mocy elektrycznej  $N_{el}$  na zakres pracy  $PPP$  i temperaturę płomienia pyłowego (węgiel brunatny,  $q_{mw} = 2,25 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,45$ )

Przeprowadzono również symulację numeryczną stopnia wypalenia pyłu węgla kamiennego (Rys. 12.5) i brunatnego (Rys. 12.6) w zależności od mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$ . Okazuje się, że większa moc elektryczna plazmotronu  $N_{el}$  poprawia warunki spalania pyłu węglowego i zwiększa stopień wypalenia części lotnych oraz koksu.



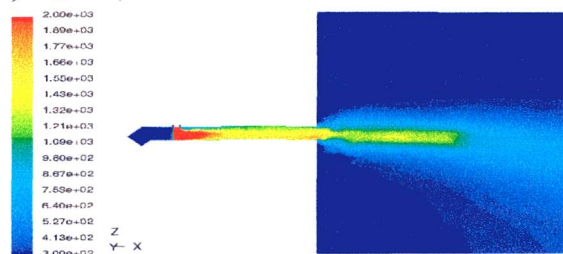
Rys. 12.5. Wpływ mocy elektrycznej  $N_{el}$  na wypalenie części lotnych i koksu w płomieniu pyłowym z  $PPP$  (węgiel kamienny,  $q_{mw} = 2,25 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,38$ )



Rys. 12.6. Wpływ mocy elektrycznej  $N_{el}$  na wypalenie części lotnych i koksu w płomieniu pyłowym z  $PPP$  (węgiel brunatny,  $q_{mw} = 2,25 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,45$ )

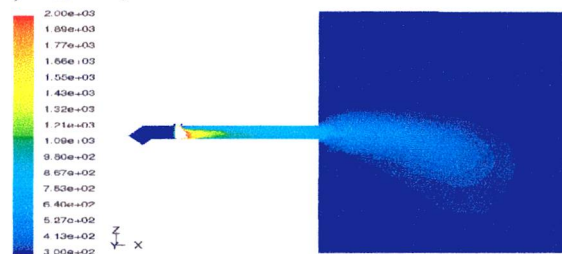
Na rysunku 12.7 pokazano, jak moc elektryczna plazmotronu  $N_{el}$  wpływa na długość płomienia pyłowego. Zmniejszenie  $N_{el}$  powoduje skrócenie długości płomienia pyłowego.

a)  $N_{el} = 3,0 \text{ kW}$



Contours of Static Temperature (K) FLUENT 6.0 (3d, segregated, spe7, ske) May 09, 2003

b)  $N_{el} = 1,5 \text{ kW}$



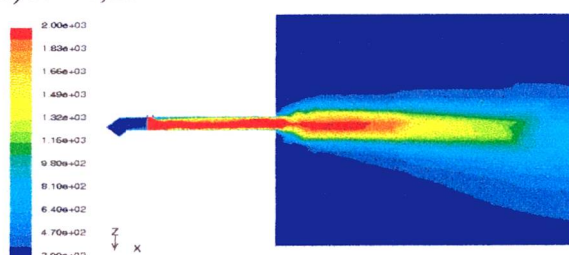
Contours of Static Temperature (K) FLUENT 6.0 (3d, segregated, spe7, ske) May 09, 2003

Rys. 12.7. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  na długość płomienia z plazmowego palnika pyłowego PPP (węgiel brunatny,  $q_{mw} = 0,75 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = \text{const}$ )

### 12.3.2. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda$ na cechy płomienia z plazmowego palnika pyłowego

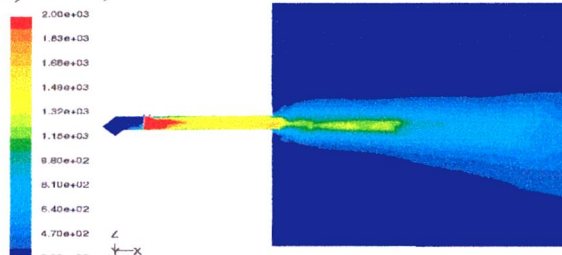
Istotny wpływ na działanie plazmowego palnika pyłowego ma współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$ . Wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono na rysunkach 12.8 ÷ 12.10.

a)  $\lambda = 0,26$



Contours of Static Temperature (K) FLUENT 6.0 (3d, segregated, spe7, ske) Apr 24, 2003

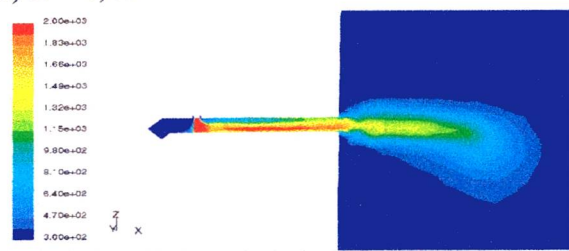
b)  $\lambda = 0,63$



Contours of Static Temperature (K) FLUENT 6.0 (3d, segregated, spe7, ske) May 13, 2003

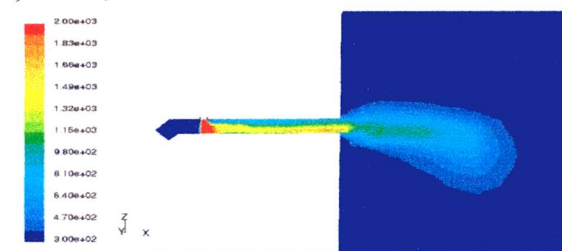
Rys. 12.8. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na zakres pracy PPP i temperaturę płomienia pyłowego (węgiel kamienny,  $q_{mw} = 2,25 \text{ kg/h}$ ,  $N_{el} = 3,0 \text{ kW}$ )

a)  $\lambda = 0,41$



Contours of Static Temperature (K) FLUENT 6.0 (3d, segregated, spe7, ske) Apr 25, 2003

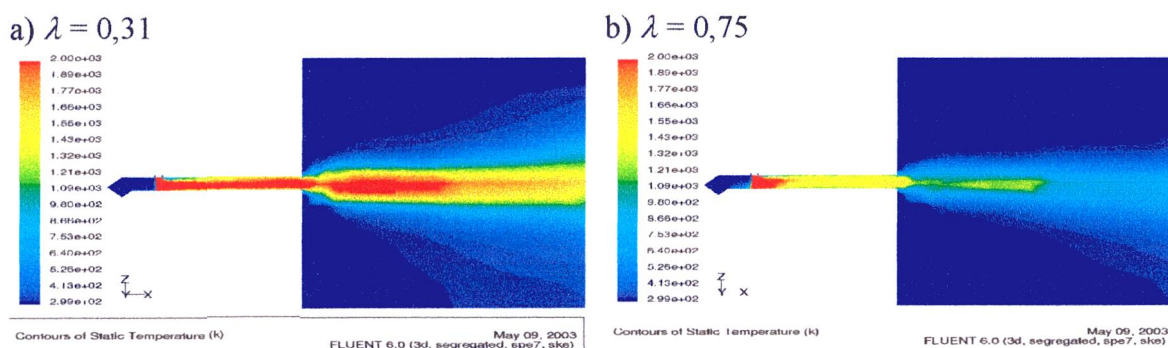
b)  $\lambda = 0,59$



Contours of Static Temperature (K) FLUENT 6.0 (3d, segregated, spe7, ske) Apr 25, 2003

Rys. 12.9. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na zakres pracy PPP i temperaturę płomienia pyłowego (węgiel kamienny,  $q_{mw} = 0,75 \text{ kg/h}$ ,  $N_{el} = 1,5 \text{ kW}$ )

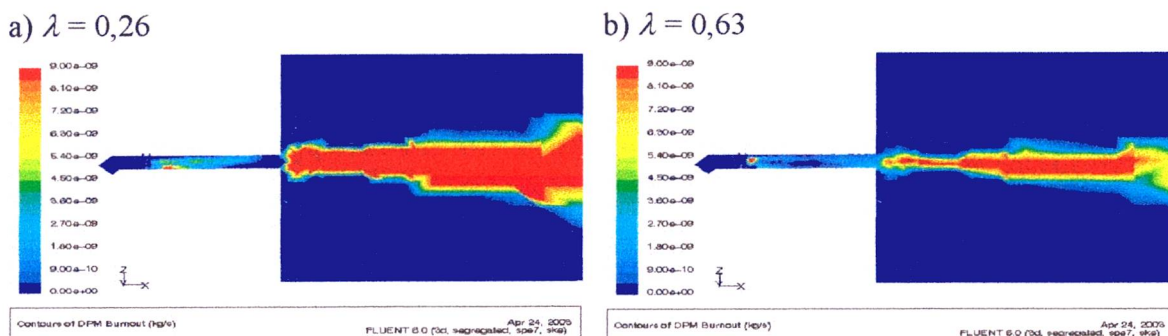




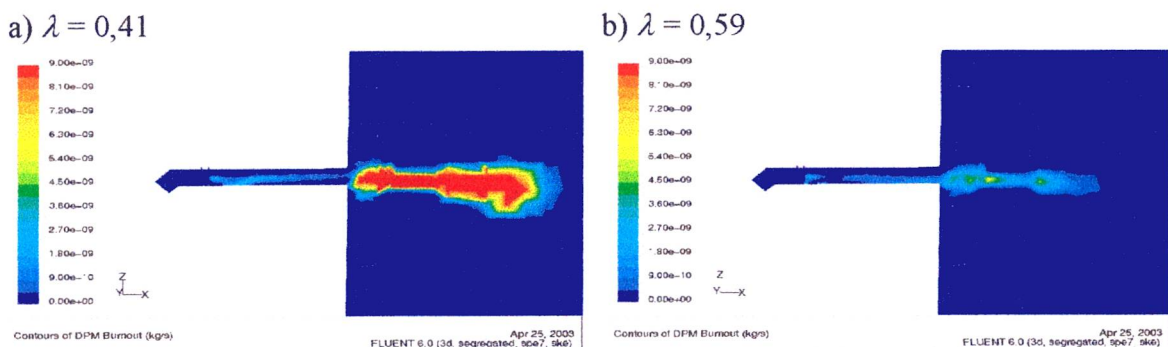
Rys. 12.10. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na zakres pracy PPP i temperaturę płomienia pyłowego (węgiel brunatny,  $q_{mw} = 2,25$  kg/h,  $N_{el} = 3,0$  kW)

Wyniki symulacji wskazują, że niezależnie od mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  i rodzaju spalanego paliwa wzrost współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  powoduje wychłodzenie płomienia pyłowego oraz zmniejszenia zakresu pracy plazmowego palnika pyłowego.

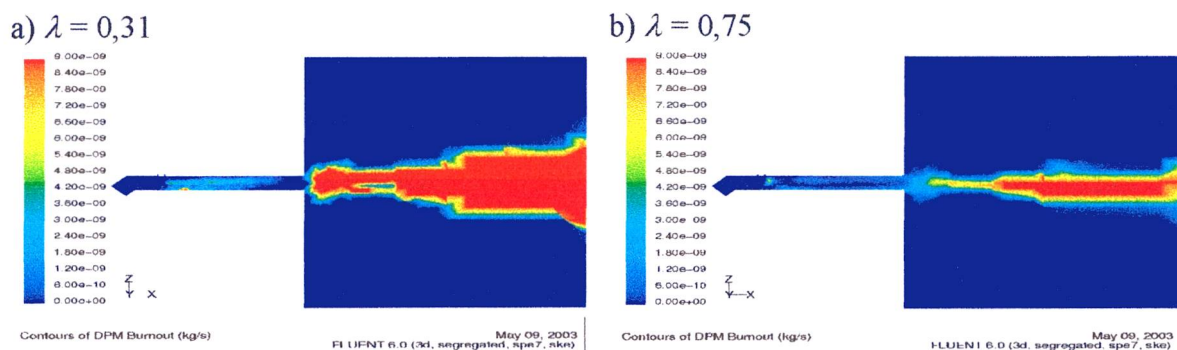
Zbadano także, jak współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$  wpływa na stopień wypalenia pyłu węglowego. Otrzymane wyniki symulacji numerycznej (Rys. 12.11 ÷ 12.13) pokazują, że ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  stopień wypalenia części lotnych i koksu zmniejsza się. Związane jest to prawdopodobnie ze skróceniem się czasu przebywania w plazmowym palniku pyłowym typu strumieniowego.



Rys. 12.11. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na wypalenie części lotnych i koksu w płomieniu pyłowym z PPP (węgiel kamienny,  $q_{mw} = 2,25$  kg/h,  $N_{el} = 3,0$  kW)



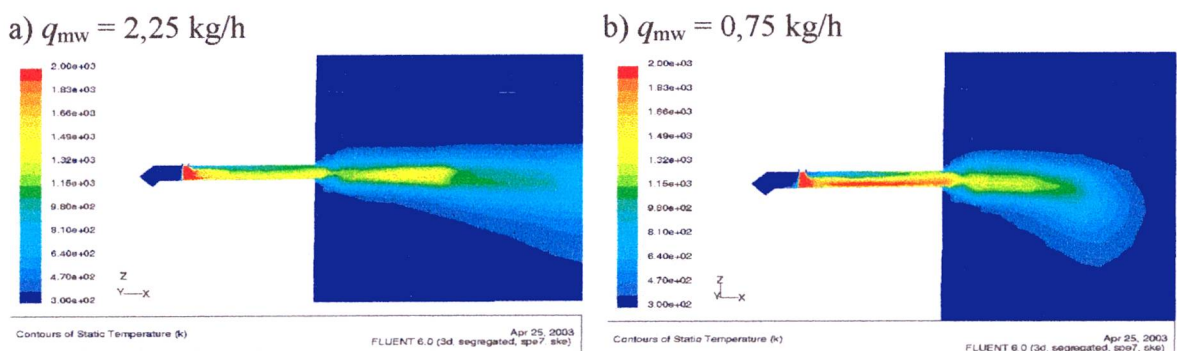
Rys. 12.12. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na wypalenie części lotnych i koksu w płomieniu pyłowym z PPP (węgiel kamienny,  $q_{mw} = 0,75$  kg/h,  $N_{el} = 1,5$  kW)



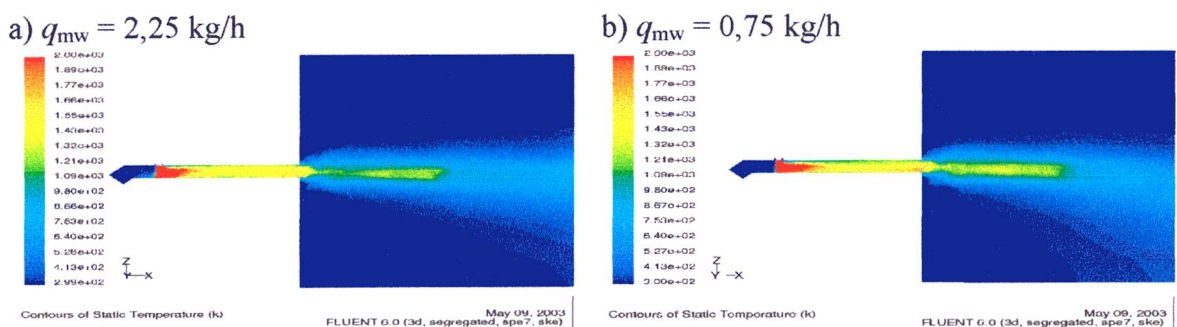
Rys. 12.13. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  na wypalenie części lotnych i koksu w płomieniu pyłowym z PPP (węgiel brunatny,  $q_{mw} = 2,25$  kg/h,  $N_{el} = 3,0$  kW)

### 12.3.3. Wpływ mocy cieplnej palnika $N_t$ na cechy płomienia z plazmowego palnika pyłowego

Badano również wpływ mocy cieplnej plazmowego palnika pyłowego  $N_t$  na długość płomienia pyłowego. Badania potwierdzają, że zwiększenie strumienia masy paliwa powoduje wzrost długości płomienia pyłowego i zwiększenie zakresu pracy palnika, zarówno w przypadku pyłu węgla kamiennego (Rys. 12.14), jak i pyłu węgla brunatnego (Rys. 12.15).



Rys. 12.14. Wpływ mocy cieplnej plazmowego palnika pyłowego  $N_t$  na długość płomienia pyłowego (węgiel kamienny,  $N_{el} = 1,5$  kW,  $\lambda = 0,41$ )

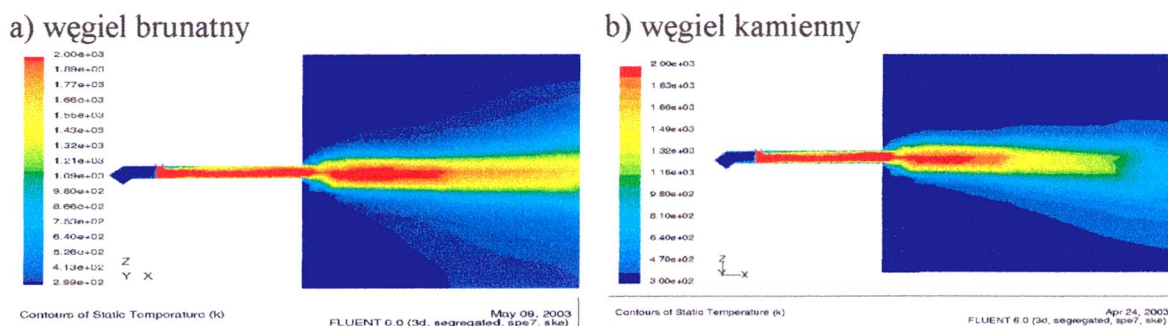


Rys. 12.15. Wpływ mocy cieplnej plazmowego palnika pyłowego  $N_t$  na długość płomienia pyłowego (węgiel brunatny,  $N_{el} = 3,0$  kW,  $\lambda = 0,95$ )



### 12.3.4. Wpływ rodzaju paliwa na zakres pracy plazmowego palnika pyłowego

Na rysunku 12.16 porównano zakres pracy plazmowego palnika pyłowego dla dwóch paliw użytych w symulacji numerycznej. Wynika z niego, że zakres pracy *PPP* w przypadku pyłu węgla brunatnego jest większy w porównaniu do zakresu pracy *PPP* zasilanego pyłem węgla kamiennego.

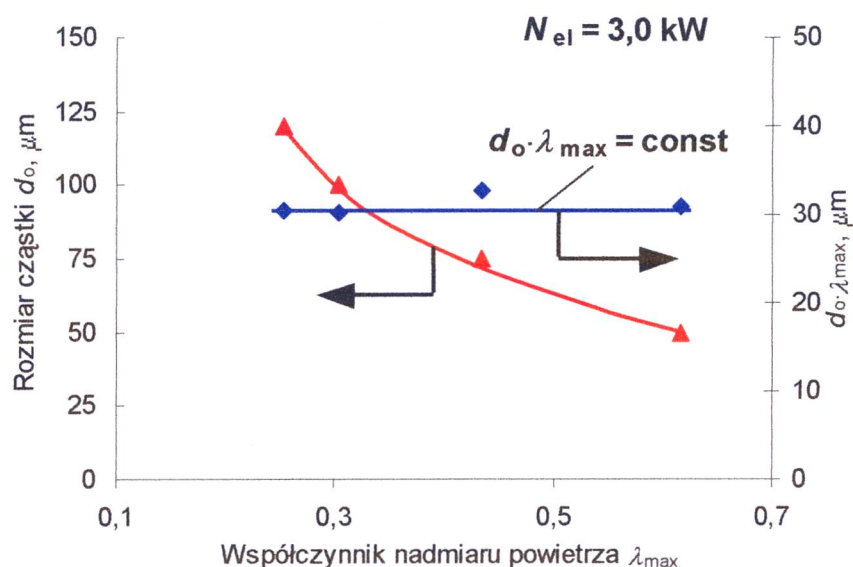


Rys. 12.16. Wpływ rodzaju paliwa na zakres pracy *PPP*  
( $N_{el} = 3,0 \text{ kW}$ ,  $q_{mw} = 2,25 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,31$ )

### 12.4. Symulacja numeryczna kryterium stabilności plazmowego palnika pyłowego

W tym punkcie nawiązano do kryterium stabilności będącym analogiem liczby *Damkoehlera*  $\tilde{Da} = (d_o \lambda)^{-1}$  podanego w punkcie 8.1.1. Symulacja numeryczna została przeprowadzona dla plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego. Założono stałe obciążenie cieplne palnika i stałą moc elektryczną plazmotronu. Do obliczeń użyto monofrakcje pyłu węgla brunatnego (50, 75, 100 i 120  $\mu\text{m}$ ). W modelu najpierw obliczano odgazowanie pyłu węglowego, a następnie spalanie koksu. Za granicę stabilności płomienia pyłowego za palnikiem przyjęto wartość współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda_{max}$ , dla którego konwersja części lotnych wynosiła 100%, natomiast konwersja koksu 0 ÷ 5%.

Przedstawione wyniki obliczeń numerycznych są zgodne z wynikami otrzymanymi eksperymentalnie, iloczyn  $(d_o \lambda_{max})$  zachowywał w przybliżeniu stałą wartość na skraju obszaru stabilności.



Rys. 12.17. Kryterium stabilności  $\tilde{Da}$  na brzegu obszaru działania plazmowego palnika pyłowego ( $\lambda_{\text{max}}$ )

## 12.5. Analiza wyników

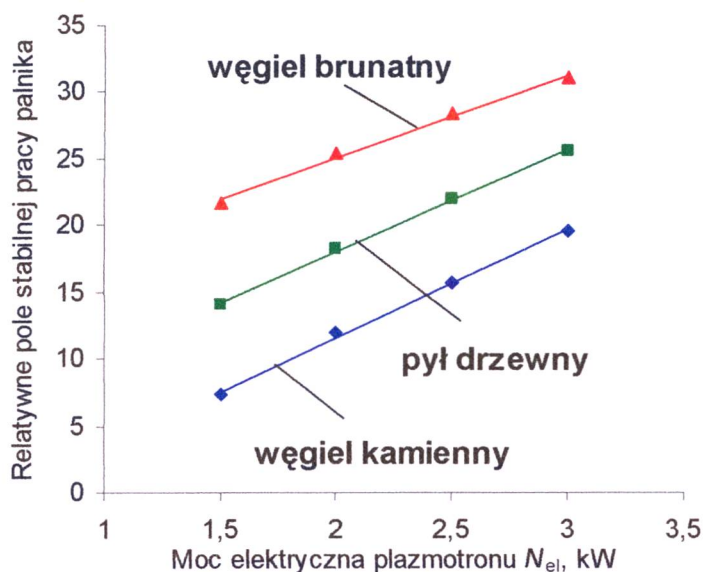
Przeprowadzona symulacja komputerowa procesów zapłonu i spalania mieszanki pyłowo – powietrznej z zastosowaniem plazmy termicznej w palniku pyłowym typu strumieniowego potwierdziła pod względem jakościowym wyniki badań doświadczalnych realizowanych w skali laboratoryjnej.

Potwierdzono również, że proponowane kryterium stabilności palnika pyłowego  $\tilde{Da} = (d_o \lambda)^{-1}$  zachowuje stałą wartość na granicy stabilności plazmowego palnika pyłowego.

Wyniki obliczeń numerycznych wskazują, że metodę symulacji komputerowej można wykorzystać do projektowania plazmowych systemów rozruchowych w rzeczywistej skali.

### 13. Dyskusja wyników

a) Wyniki wykonanych badań doświadczalnych pokazały, że strumień plazmy efektywnie podtrzymuje płomień pyłowy, ale zakres stabilnej pracy plazmowego palnika pyłowego zależy od mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$ . Jeżeli umownie przyjąć za miarę zakresu stabilności plazmowego palnika pyłowego pole powierzchni na jego charakterystyce, to okaże się, że zakres stabilności palnika niemal liniowo zależy od mocy elektrycznej plazmotronu (Rys. 13.1).



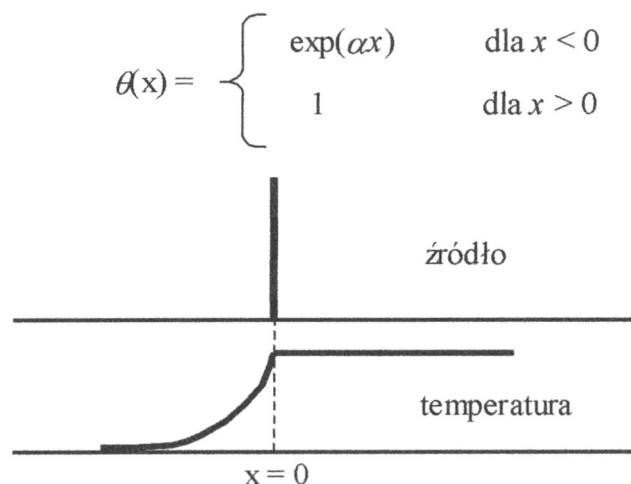
Rys. 13.1. Wpływ mocy elektrycznej plazmotronu na zakres stabilnej pracy plazmowego palnika pyłowego (wykonane na podstawie rysunków 9.1 ÷ 9.3)

b) Zasadniczą część badań doświadczalnych wykonano dla plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego uważając, że nadaje się on najlepiej dla zastosowań kotłowych. Dla tego typu palnika przeprowadzono też jakościową analizę matematyczną oddziaływania plazmy na strumień pyłu w oparciu o teorię *CSTR*. Korzystano przy tym z faktu intensywnego mieszania w palniku typu cyklonowego. Uzyskana interpretacja dobrze tłumaczy wyniki doświadczalne.

Znacznie mniej miejsca poświęcono plazmowemu palnikowi typu strumieniowego, ale ponieważ ten typ palnika plazmowego może znaleźć zastosowanie w piecach cementowych, więc warto także rozpatrzyć czynniki decydujące o zakresie jego stabilności. W tym przypadku interpretacja matematyczna może opierać się na teorii propagacji płaskiego płomienia oraz na warunku stateczności płomienia, który mówi, że „w co najmniej jednym punkcie profilu prędkości, prędkość propagacji płomienia  $S_u$  musi być równa lub większa od prędkości przepływu mieszanki  $w$ ” [69, 116]:

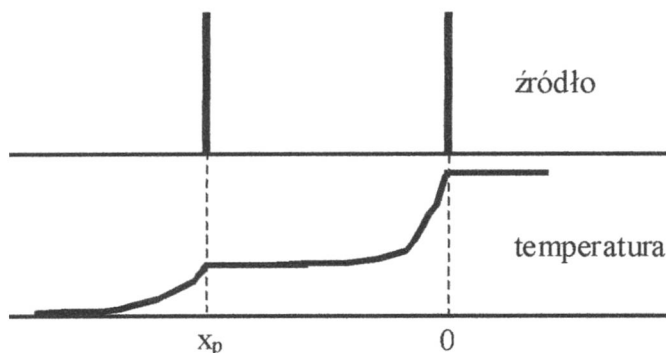
$$S_u \geq w \quad (13.1)$$

W teorii propagacji płomienia, w pierwszym przybliżeniu, front płomienia może być identyfikowany z funkcją *delta Diraca*  $\delta(x)$ , a wynikająca zmiana bezwymiarowej temperatury opisana jest prostą funkcją:



Także oddziaływanie plazmy na strumień czynnika może być idealizowane jako funkcja *delta Diraca*  $P\delta(x)$ , dająca podobny efekt cieplny. Kryterium stabilizacji płomienia plazmą można więc zdefiniować w ten sposób, że w zmodyfikowanym strumieniu plazmy mieszance muszą wystąpić warunki do propagacji płomienia:

$$S_u \geq w_p (x > x_p) \quad (13.2)$$



Podczas eksperymentów wykonanych w rurze kwarcowej obserwowano zachowanie płomienia pyłowego zgodne z przedstawionym modelem. Jeżeli moc plazmotronu była zbyt mała płomień urywał się, kiedy moc była dostatecznie duża płomień stabilizował się koło miejsca wyładowania. W przypadku niektórych mieszanin pyłowo – powietrznych płomień „przeskakiwał” nawet przed plazmą i stabilizował się u wlotu dystrybutora mieszanki.

c) Proponowane kryterium stabilności spalania pyłu węglowego wspomaganego plazmą w postaci odwrotności iloczynu rozmiaru cząstki węglowej i współczynnika nadmiaru powietrza  $(d_0 \cdot \lambda)^{-1}$  stanowi analog kryterium stabilności płomienia gazowego za



statecznikiem [4]. Znaczenie tego kryterium polega na tym, że za decydujący dla stabilności płomienia pyłowego przyjęto czas nagrzewu cząstki paliwa stałego. W ten sposób pominięto trudny do ujęcia w takim kryterium problem kinetyki chemicznej spalania cząstki węgla. Wydaje się, że otrzymane kryterium może mieć szersze zastosowanie do palników i palenisk pyłowych.

d) Zakres pracy plazmowego palnika pyłowego zależy również od właściwości fizykochemicznych paliwa. Problem ten jest znacznie szerszy w technice kotłowej, bowiem dotyczy zamienności węgla w danym palenisku pyłowym lub palniku. Przeprowadzone badania doświadczalne pozwoliły uszeregować użyte w badaniach paliwa w następujący sposób:

**węgiel brunatny > pył drzewny > węgiel kamienny > łupek powęglowy (50%)**

Zasadniczym problemem było jednak znalezienie kryterium, które uzasadniałoby takie uszeregowanie. Brano pod uwagę różne kryteria, okazało się jednak, że najlepiej do klasyfikacji paliw nadaje się współczynnik  $K_{st}$ . Wydaje się, że podano przekonujące uzasadnienie dla takiego wyniku. Ze względów praktycznych ważne jest, że parametr  $K_{st}$  można szybko i łatwo wyznaczyć stosując odpowiednią aparaturę.

e) Wyniki badań właściwości płomienia pyłowego za plazmowym palnikiem pyłowym pokazały, że typ palnika (cyklonowy, strumieniowy) nie ma większego wpływu na temperaturę płomienia. Cechy płomienia pyłowego także niewiele zależą od mocy plazmotronu, ale zasadniczy wpływ na nie ma moc cieplna palnika pyłowego.

Największy wpływ na emisję  $NO_x$  i  $CO$  z płomienia pyłowego stabilizowanego plazmą ma współczynnik nadmiaru powietrza. Plazmowy palnik pyłowy charakteryzuje się dobrą dynamiką rozruchu, po okresie  $30 \div 50$  sekund warunki jego działania ustalają się.

f) Podczas badań laboratoryjnych, w zależności od rodzaju użytego paliwa stałego i mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$ , stosunek mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el}$  do mocy cieplnej palnika  $N_t$  zmieniał się w zakresie  $N_{el}/N_t = 0,08 \div 5,61$ . W przypadku węgla kamiennego, dla strumienia masy paliwa  $q_{mw} = 2,5$  kg/h i mocy elektrycznej plazmotronu  $N_{el} = 1,5$  kW, stosunek  $N_{el}/N_t$  wynosił 0,08. Wskazuje to na spadek zapotrzebowania mocy elektrycznej plazmotronu ze wzrostem mocy cieplnej palnika pyłowego, co ma znaczenie dla zastosowań praktycznych.

g) Użyty w badaniach plazmotron przepracował około 200 godzin i nie stwierdzono zauważalnego zużycia anody. Zaobserwowano niewielkie zużycie materiału katody.

Pozwala to sądzić, że także w przypadku większej mocy plazmotronu zużycie elektrod będzie w dopuszczalnych granicach, jeżeli gazem roboczym będzie argon. W związku z tym, koszty związane z eksploatacją i wymianą elektrod będą niewielkie.

h) Argumentem za kontynuowaniem badań w większej skali może być porównanie kosztów rozruchu kotłów z użyciem palników mazutowych i plazmowych palników pyłowych. W tym celu dokonano analizy kosztów rozruchu kotła *BB 1150* opalanego węglem brunatnym od stanu zimnego z zastosowaniem plazmowego systemu rozruchowego. Otrzymany wynik porównano z kosztem rozruchu tego kotła przy użyciu mazutu. Wszystkie dane do obliczeń i porównania pochodzą z jednej z elektrowni zawodowych „na węgiel brunatny” (Tab. 13.1).

Tabela 13.1

Porównanie kosztów rozruchu kotła pyłowego *BB 1150* z użyciem palników mazutowych i plazmowych palników pyłowych

|                                                                          | Jednostka | Wartość           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------|
| Wartość opałowa mazutu                                                   | MJ/kg     | 39,0 ÷ 41,0       |
| Wartość opałowa węgla brunatnego                                         | MJ/kg     | 7,6 ÷ 8,4         |
| Cena mazutu (średnia)                                                    | zł/Mg     | 500               |
| Cena węgla brunatnego                                                    | zł/Mg     | 38                |
| Cena energii elektrycznej potrzeb własnych                               | zł/MWh    | 110               |
| Zużycie energii elektrycznej przez młyn na wentylację i przemiał węgla   | MWh/Mg    | 0,009 ÷ 0,014     |
| Zużycie energii elektrycznej na zapłon i spalanie węgla przez plazmotron | MWh/Mg    | 0,05 ÷ 0,15       |
| Zużycie mazutu na jeden rozruch kotła ze stanu zimnego                   | Mg        | 215 ÷ 315         |
| Zużycie węgla na jeden rozruch kotła w przypadku zastąpienia mazutu      | Mg        | 1325              |
| Koszt mazutu na jeden rozruch kotła ze stanu zimnego                     | zł        | 107 500 ÷ 157 500 |
| Koszt węgla na jeden rozruch kotła w przypadku zastąpienia mazutu        | zł        | 50 350            |
| Koszt przemiału węgla w przypadku zastąpienia mazutu                     | zł        | 1 680             |
| Koszt energii elektrycznej na zasilanie plazmotronu                      | zł        | 13 250            |
| Średni koszt rozruchu za pomocą plazmowych palników pyłowych             | zł        | 65 280            |
| Średni koszt mazutu na jeden rozruch kotła ze stanu zimnego              | zł        | 132 500           |

W przedstawionej analizie została uwzględniona zamiana mocy cieplnej paliwa ciekłego (mazutu) na odpowiadającą mu moc cieplną paliwa stałego (węgla brunatnego). Nie zostały uwzględnione dodatkowe koszty związane z pracą palnika olejowego, takie jak: podgrzewanie mazutu i eksploatacja instalacji mazutowej, emisja sadzy, konserwacja palnika. W kosztach pracy plazmowego palnika pyłowego nie ujęte zostały koszty wymiany zużytych elektrod, zużycie gazu plazmotwórczego oraz chłodzenia plazmotronu.

Z analizy kosztów wynika, że plazmowy rozruch kotła pyłowego jest około dwa razy mniejszy w porównaniu do rozruchu kotła z użyciem mazutu, co czyni je interesującym i ekonomicznie uzasadnionym alternatywnym rozwiązaniem.

i) Uzyskane wyniki badań w skali laboratoryjnej mogą być punktem wyjścia do dalszych badań prowadzonych w większej skali nad „plazmowym” rozruchem kotłów pyłowych i stabilizacją płomienia pyłowego przy pomocy plazmy. Należy sądzić, że w większej skali działania plazmowego palnika pyłowego warunki stabilności płomienia pyłowego poprawią się, zwiększy się stopień wypalenia, a emisja *CO* ulegnie znacznemu obniżeniu. Wynika to z wydłużenia czasu przebywania cząstek węglowych w palniku plazmowym i komorze paleniskowej oraz wyższej temperatury otoczenia. Zmniejszyć powinno się również relatywne zapotrzebowanie na moc elektryczną do plazmowego palnika pyłowego.

## 14. Podsumowanie i wnioski końcowe

Stabilność płomienia pyłowego należy do najważniejszych zagadnień w technice spalania paliw stałych. W kotłach pyłowych ma ona znaczenie dla sprawności kotła i dyspozycyjności bloku oraz wpływa na emisję zanieczyszczeń. W związku z tym prowadzi się prace badawcze nad zwiększeniem zakresu stabilnego płomienia pyłowego, przede wszystkim w celu umożliwienia obniżenia minimum technicznego kotłów energetycznych. Jednym ze sposobów poprawy stabilności płomieni pyłowych jest wykorzystanie plazmy zapewniającej pewny zapłon i stateczność spalania mieszanek pyłowo – powietrznej.

W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych nad mechanizmem zapłonu i stabilizacji płomienia pyłowego za pomocą plazmy. Rozpatrywano wpływ mocy elektrycznej plazmotronu oraz właściwości fizykochemicznych paliw stałych na zakres działania plazmowego palnika pyłowego. Uszeregowano użyte w badaniach paliwa stałe ze względu na ich przydatność dla plazmowego palnika pyłowego. Zaproponowano parametr, który według wykonanych badań i przeprowadzonej analizy pozwala określić zdolność do zapłonu oraz stabilnego spalania danego rozdrobnionego paliwa stałego.

Celem interpretacji otrzymanych wyników laboratoryjnych przeprowadzono analizę matematyczną procesu i modelowanie numeryczne. Korzystając z modelu *CSTR* pokazano wpływ oddziaływania plazmy na pracę plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego. Natomiast obliczenia numeryczne, przeprowadzone dla plazmowego palnika pyłowego typu strumieniowego, potwierdziły znaczenie rozmiarów cząstki węglowej na stabilność płomienia pyłowego i uwiarygodniły proponowane kryterium stabilności płomienia pyłowego.

Przeprowadzone badania upoważniają do przedstawienia następujących wniosków:

1. Plazma termiczna jest silnym i pewnym źródłem zapłonu rozdrobnionych paliw stałych.
2. Zakres stabilnej pracy plazmowego palnika pyłowego rośnie niemal liniowo ze zwiększeniem mocy elektrycznej plazmotronu.
3. Ze względu na organizację procesu spalania można wyróżnić dwa typy plazmowych palników pyłowych: strumieniowy i cyklonowy.
4. Zakres pracy plazmowego palnika pyłowego zasadniczo zależy od właściwości paliwa stałego.
5. Współczynnik  $K_{st}$  może pełnić rolę kryterium dla porównania różnych węgli pod względem przydatności do palników pyłowych.



6. Analogiem kryterium stabilności płomienia pyłowego może być odwrotność iloczynu rozmiaru cząstek paliwa i współczynnika nadmiaru powietrza.
7. Plazmowy palnik pyłowy generuje długi i gorący płomień pyłowy.
8. Zapotrzebowanie mocy elektrycznej plazmotronu w stosunku do mocy cieplnej plazmowego palnika pyłowego ma się jak 1:10.
9. Modelem plazmowego palnika pyłowego typu cyklonowego może być reaktor chemiczny z doskonałym wymieszaniem z dodatkowym źródłem ciepła.
10. Analiza kosztów wskazuje, że plazmowy system zapłonowy może być konkurencyjnym rozwiązaniem do mazutowego układu rozpałkowego w rozruchu kotłów pyłowych.

#### Dalsze plany

Prowadzenie badań nad plazmowym systemem rozruchowym w skali póltechnicznej celem rozwiązania problemów technologicznych i eksploatacyjnych w rzeczywistych warunkach pracy kotłów pyłowych.

## Literatura:

- [1] Merkisz J.: Silniki tłokowe. Red. P. Wolański, Problemy spalania w silnikach spalinowych, Ekspertyza PAN, Warszawa, 2000
- [2] Dale J.D. i inni: Application of high energy ignition systems to engines, Prog. Energy Combust. Sci., 1997, Vol. 23, s. 379
- [3] Wagner T.C., O'Brien W.F.: Plasma torch igniters for scramjets, Journal of Propulsion and Power, Vol. 5, No. 5, Sept. – Oct., 1989
- [4] Lefebvre A.H.: Gas turbine combustion, Hemisphere Publishing Corporation, 1983
- [5] Bobek J.: Palniki zapalające i zapalarki wysokoenergetyczne dla palników olejowych i gazowych, Gospodarka Paliwami i Energią, 2001, Nr 1, s. 13
- [6] Berman C.H., Gill R.J., Calcote H.F.: NO<sub>x</sub> reduction in flames stabilized by an electric field, ASME, Vol. 33, 1991, s. 71
- [7] Piecuch T.: Termiczna utylizacja odpadów i ochrona powietrza przed szkodliwymi składnikami spalin, Politechnika Koszalińska, Koszalin, 1998
- [8] Brzeski J. i inni: Chemia plazmy niskotemperaturowej, Warszawa, WNT, 1983
- [9] Celiński Z.: Plazma, Warszawa, PWN, 1980
- [10] Zdanowski J.: Wyładowania elektryczne w gazach, PWR, Wrocław, 1975
- [11] Kordus A.: Plazma w technice, Politechnika Poznańska, Poznań, 1973
- [12] Szczeniowski Sz.: Fizyka doświadczalna – elektryczność i magnetyzm, PWN, Warszawa, 1966
- [13] Jacob A.: Procesing with plasma, The Chemical Engineer, 30 May, s.33-35, 1991
- [14] Arcimovic L.A.: Elementarna fizyka plazmy, Atomizdat, Moskwa, 1969
- [15] Hering M.: Podstawy elektrotermii, cz. II, WNT, Warszawa, 1998
- [16] Spiglanin T.A. i inni: Time-resolved imaging of flame kernels: laser spark ignitron of H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/Ar mixtures, Combustion and Flames, Vol. 102, 1995, s. 310
- [17] Niewiedział R.: Badania plazmotronów łukowych prądu stałego oraz weryfikacja metod analitycznego ujmowania ich charakterystyk eksploatacyjnych, Politechnika Poznańska, Poznań, 1999
- [18] Krapivina S.A.: Plazmochimičeskie technologičeskie procesy, Chimija, Leningrad, 1981
- [19] Niewiedział R.: Plazmotrony łukowe z wydrążoną katodą, cz. I, Przegląd Elektrotechniczny, R. LXXII. 1, Nr 1, 1996, s. 7-10

- [20] Dautov G.Ju., Džuba V.L., Karp I.N.: Plazmotrony so stabilizirovannymi električeskimi dugami, Naukova Dumka, Kiev, 1984
- [21] Messerle W.E., Peregubow W.S.: Nizkotemperaturnaja plazma – plazmennaja bezmazutnaja rastopka kotlov i stabilizacija gorenija pyleugolnogo fakela, Novosibirsk, Nauka, 1995
- [22] Kamińska-Benmechernene A.: Wytwarzanie i modelowanie plazmy w plazmotronów łukowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998
- [23] Stryczewska H.D.: Elektromagnetyczny układ zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, Politechnika Lubelska, Lublin, 1998
- [24] Karpenko E.I., Zukov M.F., Messerle V.E., Bujantujev S.L., Djakov A.F., Peregudov V.S.: Naučno – techničeskie osnovy i opyt ekspluatacii plazmennych sistem vosplamenenija uglej na TES, Novosibirsk, Nauka, 1998
- [25] PN-84/C-01200/09
- [26] Glassman I.: Combustion, Academic Press, San Diego, 1996
- [27] Field P.: Dust explosions, Handbook of Powder Technology, Vol. 4, Elsevier, Amsterdam–Oxford–New York, 1982
- [28] Herzberg M., Conti R.S., Cashdollar K.L.: Spark ignition energies for dust – air mixtures: temperature and concentration dependences, Proc. at 20<sup>th</sup> Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1984, s. 1681-1690
- [29] Weinberg F.J.: Ignition by plasma jet, Nature, Vol. 272, 1978, s. 341
- [30] Dyjakon A. i inni: Urządzenie do plazmowego zapłonu rozpylonych paliw ciekłych, zgłoszenie patentowe w Urzędzie Patentowym RP nr P353752
- [31] Dyjakon A.: Plazmowy zapłon paliw ciekłych, Grant KBN Nr 4T10B00824, 2003
- [32] Takita K.: Ignition and flame-holding by oxygen, nitrogen and argon plasma torches in supersonic airflow, Combustion and Flame, Vol. 128, 2002, s. 301
- [33] Wolański P.: Dust explosion research in Poland, Powder Technology, Vol. 71, 1992
- [34] Cybulski W.: Wybuchy pyłu węglowego i ich zwalczanie, Gliwice, Wyd. Śląsk, 1973
- [35] Hertzberg M., Cashdollar K.L., Oferrn J.J.: The flammability of coal dust-air mixtures, Bureau of Mines, RI 8360, Washington, 1979
- [36] Karpenko E.I., Messerle V.E.: Vvedenie w plazmenno – energetičeskie technologii ispolzovanija tverdyh topliv, Nauka, Novosibirsk, 1997
- [37] Calcote H.F., Berman C.H.: Increased methane – air stability limits by a dc electric field, ASME, Vol. 25, 1989, s. 25

- [38] Czernichowski A., Lesueur H., Fillon G.: Proc Workshop on Plasma Destruction of Wastes, Odeillo-Font Romeu, France, 1990
- [39] Fridman A., Nester S., Kennedy L.A., Salveliev A., Mustaf-Yardimci O.: Gliding arc gas discharge, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 25, 1999, s. 211-231
- [40] Czernichowski A., Lesueur H., 10<sup>th</sup> Int Symp on Plasma Chemistry, 3.2.1., Bochum, Germany, 1991
- [41] Łatak J.M.: Plazmowy utylizator rozwiązuje problem odpadów, Gospodarka Paliwami i Energią, Nr 11, 2001, s.26
- [42] Łozowiecka-Stupnicka T., Zaniewski Z.: Plazmowa technologia unieszkodliwiania odpadów, Problemy Ekologii, Vol. 4, Nr 4, lipiec-sierpień 2000, s. 153-157
- [43] Chang J. et al.: Thermal plasma pyrolysis of used old tires for production of syngas, J Environ. Sci. Health, Part A: Environ. Sci. Eng. Toxic Hazard. Subat. Control, A31, (7), 1996, pp. 1781-1799
- [44] Inaba T., Nagano M., Endo M.: Investigation of plasma treatment for hazardous wastes such as fly ash and asbestos, Electrical Engineering in Japan, Vol. 126, No. 3, pp. 831-838, 1999
- [45] Sheng J.: Vittrification of borate waste from nuclear power plant using coal fly ash. (I) Glass formulation development, Fuel, Vol. 80, 2001, pp. 1365-1369
- [46] Berman C.H., Dreizin E.L., Hoffmann V.K., Calcote H.F.: An atmospheric pressure glow discharge for enhanced combustion, AeroChem Research Lab. Inc., GRI-95/0243, Princeton, New Jersey, 1995
- [47] Błaszczuk A.: Piroliza węglowodorów, WNT, Warszawa, 1973
- [48] Gladish H., Chem. Ing. Tech., 41 (4), 205, 1969
- [49] Szekely J., Apelian D.: Plasma Processing and Synthesis of materials, Littlewood K.: Interaction of coal particles injected into argon and hydrogen plasmas, Symposium, November 1983, Boston Massachusetts, U.S.A., s.127
- [50] Bond R.L., Lander W.R., McColnnel G.I.T., Fuel, Nr 5, 1966, s. 381
- [51] Szekley J., Apelian D.: Plasma Processing and Synthesis of materials, Giacobbe F.W., Schmerling D.W.: Design and use of an efficient plasma jet reactor for high temperature gas/solid reactions, Symposium, November 1983, Boston Massachusetts, U.S.A., s. 133
- [52] Tomeczek J.: Spalanie węgla, Gliwice, WPS, 1992
- [53] Klemens R.H.: Mechanizm propagacji i struktura płomienia w mieszaninach pyłowo – powietrznych i hybrydowych, Wyd. Pol. Warsz., Warszawa, 1993



- [54] Chomiak J.: Podstawowe problemy spalania, PWN, Warszawa, 1977
- [55] Zhu A., Wang Z., Jiang Ch., Yuan Y., Xu Y.: Investigation on ignition of pulverized coal – air flow by core flame torch, Coal Combustion, U.S.A., 1988
- [56] Kordylewski W. i inni: Spalanie i paliwa, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław, 2001
- [57] Rybak W. Kordylewski W., Karcz H.: The kinetics of combustion of coal volatiles, Fuel, Vol. 66, 1987, pp. 139-141
- [58] Klemens R., Wolański P.: Flame structure in dusted and hybrid-air mixtures near lean flammability limits, 10<sup>th</sup> ICDERS, Berkeley, California, Aug. 4-9, 1995
- [59] Lee Y.Y.: Non premixed turbulent reacting flow near extinction, Combustion and Flame, Vol. 101, 1995, s. 501
- [60] Lokwood F.C., Romo-Millares, C.A.: Mathematical modelling of fuel – NO emissions from PF burners, J. of the Energy, Sept. Vol. 65, 1992
- [61] Orłowski P., Dobrzański W., Szwarc E.: Kotły Parowe, WNT, Warszawa, 1979
- [62] PN-G-04516:1998, Paliwa stałe – Oznaczenie zawartości części lotnych metodą wagową
- [63] Smoot L.D.: Fundamentals of coal combustion – for clean and efficient use, Coal Science and Technology 20, Elsevier, Amsterdam, 1993
- [64] Abbas T., Costen P., Lockwood F.C., Romo-Millares C.A.: The effect of particle size on NO formation in a large-scale pulverized coal-fired laboratory furnace: measurements and modelling, Combustion and Flame, Vol. 93, 1993
- [65] Van der Lans, R.P., Glaborg P., Dam-Johansen K.: Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 23, 1997
- [66] Tigges K.D., Leisse A., Petzel K.H.: Operational experience and results achieved with the Omega process for primary denitrification at the Volklingen Co-generation Plant, VGB Kraftwerkstechnik, Vol. 77, 1997
- [67] Schettler H., Mengel A.: Fan-assisted mills – development for lignite-fired steam generators, VGB PowerTech (2000), No. 12, pp. 50–54
- [68] Djakov A.F. i inni: Plazmenno – energetičeskie tehnologii i ich mesto v teploenergetikie, Teploenergetyka, No. 6, 1998, s. 25
- [69] Jarosiński J.: Techniki czystego spalania, WNT, Warszawa, 1996
- [70] Frączek J.: Aparatura przeciwwybuchowa w wykonaniu iskrobezpiecznym, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice, 1995

- [71] Sugimoto M., Maruta K., Takeda K., Solonenko O.P., Sakashita M., Nakamura M.: Stabilization of pulverized coal combustion by plasma assist, *Thin Solid Films*, 2002, Vol. 407, s. 186
- [72] Kanilo P.M., Kazantsev V.I., Rasyuk N.I., Schuenemann K., Vavriv D.M.: Microwave plasma combustion of coal, *Fuel*, Vol. 82, 2003, s. 187
- [73] Ecker G. und andere: Das Niedertemperaturplasma – Ein Universalschlüssel zu neuen Märkten und Zukunftstechnologien, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1988
- [74] Karpenko E.I., Messerle V.E.: Vvedenie v plazmenno – energetičeskie tehnologii toplivoispolzovanija, Vostočno – Sibirskij gosudarstvennyj Technologičeskij Universitet, 1996
- [75] Informacje własne pozyskane z energetyki zawodowej, 2002-2003
- [76] Andryjowicz Cz.: Straty rozruchowe bloku energetycznego Elektrowni Bełchatów, materiały Elektrowni Bełchatów, 2001
- [77] Imankulov E.R., Messerle V.E., Sakilov Z.B., Sejtimov T.M., Ustimenko A.B.: Plazmennyy rozrig i stabilizacija gorenija fakela doneckogo ASZ, *Teploenergetika*, Nr 1, 1990, s. 51-53
- [78] Instrukcja obsługi: Analizator spalin *Madur GA-40*, *Madur Electronic*, 1994
- [79] Frank-Kameneckij D.A., Diffuzija i teploperedac̃a v chimičeskoj kinetike, Nauka, Moskva, 1987
- [80] Dyjakon A., Kordylewski W.: The influence of electric field on the ignition of pulverized coal, *Archivum Combustionis*, Vol. 22, No. 1-2, 2002, pp. 47-54
- [81] Juda J., Nowicki M.: Urządzenia odpylające, PWN, Warszawa, 1979
- [82] Kabsch P.: Odpylanie i odpylacze, WNT, Warszawa, 1992
- [83] Kordylewski W.: Effect of apparatus scale on dust explosion temperature, *Archivum Combustionis*, Vol. 11, 1991
- [84] Pelmutter D.D.: Stability of chemical reactors, Englewood Oliffs, New Jersey 1972, Prentice Hall Inc.
- [85] Wójcicki S.: Zasada eksperymentu, MON, Warszawa, 1964
- [86] Krajewski Z., Rybak W., Kordylewski W., Karcz H.: Modelowanie kinetyki spalania cząstek węglowych, Raport serii Sprawozdanie nr 43/84, PWr, Wrocław, 1984
- [87] Rybak W., Kordylewski W., Karcz H.: Evaluation of kinetic parameters of coal ignition, *Fuel*, Vol. 59, 1980, pp. 799-802
- [88] Dyjakon A., Kordylewski W.: Plazmowy zapłon płomieni pyłowych, IX Konferencja Kociołowa, 12-15 listopada, Szczyrk, Politechnika Śląska, p. 165, 2002

- [89] Frank-Kamenetskij D.A.: Diffusion and heat transfer in chemical kinetics, Plenum Press, New York, 1969
- [90] Griffiths J.F., Scott S.K.: Thermo kinetic interactions: fundamentals of spontaneous ignition and cool flames, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 13, 1987, pp. 161-197
- [91] Griffiths J.F., Barnard J.A.: Flame and combustion, (3<sup>rd</sup> ed.), Blackie A&P, Glasgow, 1995
- [92] Chzmaljan D.M., Kagan Ja.A.: Teorija gorenija i topocnye ustrojstva, Energija, Mockva, 1976
- [93] Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych: Wykorzystanie odpadów przemysłowych i komunalnych w procesie produkcji cementu – Materiały konferencyjne, Jarnołtówek, 10 października 1998, Opole, 1998
- [94] Lebecki K., Fibich A.: Parametry wybuchowości pyłów węglowych w przemysłowych młynowniach węgla (przyjęto do druku – Archiwum Spalania), 2002
- [95] Żelkowski J.: Kohleverbrennung – Brennstoff, Physik und Theorie, Technik, VGB, Essen, 1986
- [96] Strehlow R.A.: Combustion Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1984
- [97] Andrews G.E., Bradley D.: Determination of burning velocities: A critical review, Combustion and Flame, Vol. 18, 1972, pp. 133-153
- [98] Bradley D., Mitcheson A.: Mathematical solution for explosions in spherical vessels, Combustion and Flame, Vol. 26, 1976, pp. 201-217
- [99] Wolański P., Klemens R., Gieras M.: Evaluation of turbulent burning velocity for dust mixtures, International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Bergen, Norway, 23-26 June, 1996, pp. 5.35-5.51
- [100] Dahoe A.E., Zevenbergen J.F., Verheijen P.J.T., Lemkowitz S.m., Scarlett B.: Dust explosions in spherical vessels: prediction of the pressure evolution and determination of the burning velocity and flame thickness, International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Bergen, Norway, 23-26 June, 1996, pp. 5.67-5.86
- [101] ISO 6184/1-1985 (E): Explosion protection system Part 1 – Determination of explosion indices of combustible dusts in air
- [102] Solomon P.R., Colket M.B.: Coal devolatilization, 17<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion, 1979, pp.131-140

- [103] Suuberg E.M., Peters W.A., Howard J.B.: Product composition and kinetics of lignite pyrolysis, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., Vol. 17, No. 1, 1978, pp. 37-45
- [104] Badzioch S., Hawskley P.: Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles, Ind. Eng. Chem. Process, Des. Develop., Vol. 9, No. 4, 1970, pp. 521-530
- [105] Essenhigh R., Misra M., Shaw D.: Ignition of coal particles. A review, Combustion and Flame, Vol. 77, 1989, pp. 3-30
- [106] Zhong S.: Modeling and numerical simulation of coal dust-air explosions, Ph.D. Thesis, Pol. War., Warszawa, 2002
- [107] Xiangyang Du, Kalyan Annamalai: The transient ignition of isolated coal particle, Combustion and Flame, Vol. 97, 1994, pp. 339-354
- [108] Żelkowski J., Sturm A., Mauritz O.: Combustion property characterization of imported coals by index, VGB PowerTech, Nr 10, 1998, pp. 83-87
- [109] Kordylewski W. i inni: Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław, 2000
- [110] Pershing D.A., Wendt J.O.L.: Relative contributions of volatile nitrogen and char nitrogen to  $NO_x$  emissions from pulverized coal flames, Ind. Enging. Chem. Process Des. Dev., Vol. 18, 1978
- [111] Su S., Pohl J.H., Holcombe D., Hart J.A.: Techniques to determine ignition, flame stability and burnout of blended coals in p.f. power station boilers, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 27, 2001, pp. 75-98
- [112] Wessel R.A., Fiveland W.A.: A model for predicting formation and reduction of  $NO_x$  in three – dimensional furnaces burning pulverized fuel, Journal of the Institute of Energy, March 1991, 64, pp. 41-54
- [113] Weber R., Visser B.M.: Computations of near burner zone properties of swirling pulverized coal flames, Raport on the MMF 2, IFRF Doc. No. F 336/a/13, Ijmuiden, June 1989
- [114] Chakravarty A., Lockwood F.C., Sinicropi G.: The prediction of burner stability limits, Combust. Sci. Tech., Vol. 42, 1984, pp. 67-86
- [115] Fluent Europe LTD: Fluent 6 User's Guide Vol. 1-5, Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, 2001
- [116] Bear J.M., Chigier M.A.: Combustion aerodynamic, Applied Science Publishers, LTD, London, 1972
- [117] VGB PowerTech: Charakterisierung von Kraftwerkskohlen, VGB-R 210, Erste Ausgabe, Essen, 2003



- [118] Lewis B., Von Elbe G.: Combustion, flames and explosions in gases, Academic Press, New York, 1961 (in Russian)
- [119] Siwek R.: Development of a 20 ltr laboratory apparatus and its application for the investigation of combustible dusts, Ciba-Geigy Limited Specialist, Explosion Technology, Basel, Switzerland, 1985

## Dodatek A

### Teoria reaktora chemicznego z doskonałym wymieszaniem

Adiabatyczny reaktor z idealnym wymieszaniem (ang. *CSTR – Continuously Stirred – Tank Reactor*) jest modelem do teoretycznej analizy i opisu fundamentalnych reakcji termochemicznego oddziaływania reagentów. Pozwala również w sposób matematyczny jakościowo określić zachowanie się rzeczywistego układu badawczego.

Punktem wyjścia do analizy matematycznej *CSTR* są równania zachowania energii i reagentów w postaci wymiarowej [90]:

- równanie zachowania energii:

$$V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = -q_v \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T - T_o) - \alpha \cdot S \cdot (T - T_{ot}) + Q \cdot V \cdot c \cdot k \quad (A1)$$

- równanie zachowania masy reagentów o stężeniu  $c$ :

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = -q_v \cdot (c - c_o) - V \cdot c \cdot k \quad (A2)$$

W celu wyrażenia powyższych równań w formie bezwymiarowej wprowadza się następujące zmienne do równań (A1) i (A2):

- temperatura bezwymiarowa:  $\theta = (T - T_a)/(RT_a^2/E)$ ,
- odwrotność bezwymiarowej energii aktywacji:  $\varepsilon = RT_a/E$ ,
- bezwymiarowa koncentracja:  $\gamma = 1 - c/c_o$ ,
- bezwymiarowy przyrost temperatury w wyniku adiabatycznego spalania:  $B = QE\rho/c_o c_p RT_a^2$ ,
- charakterystyczny czas „niutonowski”:  $t_N = V\rho c_p/\alpha S$ ,
- średni czas przebywania:  $t_{res} = V/q_v$ ,
- czas „chemiczny” (charakterystyczny czas reakcji):  $t_{ch} = 1/k(T_a)$ ,
- temperatura charakterystyczna (odniesienia):  $T_a$ ,

Równanie *Arrheniusa* zostanie przedstawione w formie bezwymiarowej zredukowanej nadwyżki temperatury  $\theta$  i bezwymiarowej energii aktywacji  $\varepsilon$  postaci:

$$\frac{k(T)}{k(T_a)} = f(\theta) = \exp\left(\frac{E}{RT_a} - \frac{E}{RT}\right) = \exp\left(\frac{\theta}{1 + \varepsilon\theta}\right) \quad (A3)$$

Wprowadzając zmienne bezwymiarowe i dokonując odpowiednich przekształceń matematycznych równania (A1) i (A2) w postaci bezwymiarowej będą miały następującą formę [90]:

- bezwymiarowe równanie zachowania energii:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{B(1-\gamma)}{t_{ch}} f(\theta) - \theta \left( \frac{1}{t_{res}} + \frac{1}{t_N} \right) \quad (A4)$$

- bezwymiarowe równanie zachowania masy reagentów:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{(1-\gamma)}{t_{ch}} f(\theta) - \frac{\gamma}{t_{res}} \quad (A5)$$

## Dodatek B

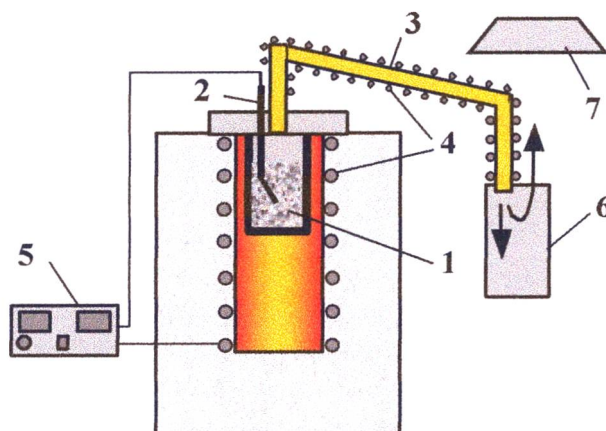
### Wyznaczanie wskaźnika *ZWZ* charakteryzującego zdolność paliwa pyłowego do zapłonu

Płomień pyłowy jest tym stabilniejszy, im niższa jest temperatura jego tworzenia oraz im większa ilość energii chemicznej zawartej w paliwie stałym wydzielila się przed fazą jego zapłonu. Jednym z parametrów pozwalających na ocenę zdolności paliwa pyłowego do zapłonu i tworzenia stabilnego płomienia pyłowego jest, proponowany przez Żelkowskiego, wskaźnik zapłonu *ZWZ* [95].

W celu określenia wskaźnika zapłonu *ZWZ* ( $\text{MJ}/(\text{kg}_{\text{paliwa}} \cdot ^\circ\text{C})$ ) dla wybranych paliw stałych (węgiel kamienny, węgiel brunatny, pył drzewny i łupek powęglowy) niezbędne było wyznaczenie potencjału zapłonu  $N_{Z500}$  oraz temperatury zapłonu  $T_{Z150}$ . Wskaźnik zapłonu *ZWZ* wyznacza się z następującego równania [117]:

$$ZWZ = \frac{N_{Z500}}{T_{Z150}} \quad (\text{D1})$$

Potencjał zapłonu  $N_{Z500}$  ( $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{paliwa}}$ ) określa ilość energii chemicznej wydzielonej z paliwa podczas jego ogrzewania do temperatury  $500^\circ\text{C}$  [108]. Aby dokładnie określić potencjał zapłonu  $N_{Z500}$  odgazowuje się próbkę paliwa pyłowego ( $m_p = 50 \text{ g}$ ,  $d_o < 200 \mu\text{m}$ ) w stałym reaktorze (Rys. B1) z prędkością nagrzewania wynoszącą  $5 \text{ K/min}$  do określonej temperatury. Przyjęta prędkość ogrzewania nie odpowiada wprawdzie prędkości przyrostu temperatury cząstek węgla w kotle pyłowym ( $10^4 \text{ K/s}$ ), ale podczas nagrzewania paliw pyłowych do niskich temperatur różnice te są niewielkie [104].

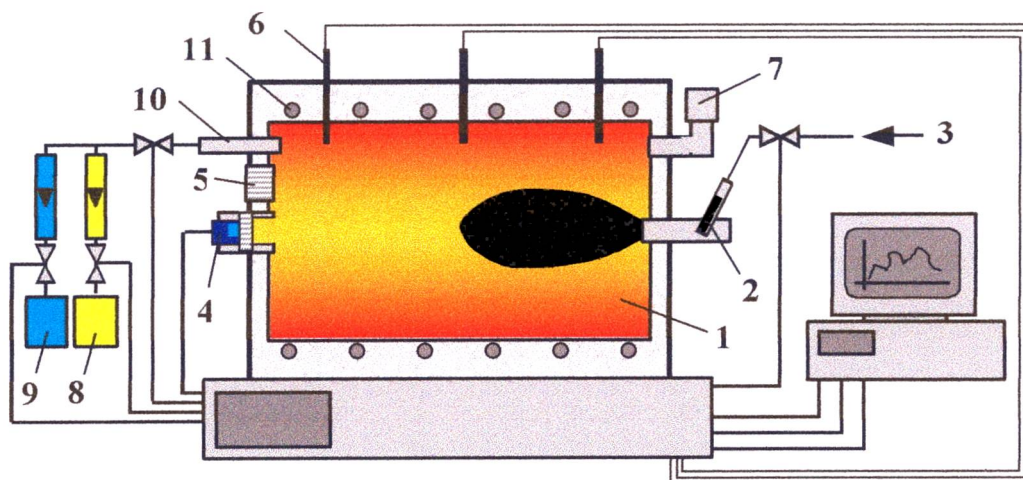


Rys. B1. Schemat stałego reaktora do odgazowania paliw pyłowych:  
1 – próbka pyłu, 2 – termopara, 3 – grzany przewód odprowadzania produktów odgazowania, 4 – elementy grzejne, 5 – regulator temperatury, 6 – pojemnik odbioru wody i smoły, 7 – wyciąg gazów



Dla każdego paliwa, w zakresie temperatur  $300 \div 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ogrzewaniu i odgazowaniu poddaje się cztery próbki. Dla próbki paliwa wyjściowego oraz uzyskanych próbek odgazowanych (koksów) przeprowadza się analizę techniczną i elementarną. Uzyskane wyniki pozwalają na przeprowadzenie bilansu energetycznego i wykreślenie krzywej energii chemicznej zawartej w częściach lotnych wydzielanych do określonej temperatury końcowej procesu ogrzewania. Z otrzymanej krzywej określa się potencjał zapłonu  $N_{Z500}$ , jako ilość energii chemicznej zawartej w częściach lotnych, które zostały wydzielone z paliwa podczas jego ogrzewania do temperatury  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , czyli jeszcze przed fazą zapłonu.

Temperatura zapłonu  $T_{Z150}$  określa natomiast temperaturę, w której próbka pyłu ( $m_p = 0,3\text{ g}$ ,  $d_o < 63\text{ }\mu\text{m}$ ) wdmuchnięta do komory zapłonowej (Rys. B2) zapala się po czasie  $150\text{ ms}$  [108]. Wyznacza się ją z przebiegu krzywej czasu indukcji zapłonu w funkcji temperatury panującej w komorze zapłonowej. Czas  $150\text{ ms}$  wybrano, jako czas niezbędny do powstania płomienia pyłowego w odległości  $3\text{ m}$  od dyszy palnika, przy założeniu, że prędkość maksymalna powietrza pierwotnego nie przekracza  $20\text{ m/s}$  [61].



Rys. B2. Schemat stanowiska do wyznaczania czasu indukcji zapłonu:

1 – komora zapłonowa, 2 – naważka pyłu, 3 – sprężone powietrze, 4 – fotodetektor, 5 – wziernik, 6 – termopara, 7 – zawór wylotowy, 8 – dwutlenek węgla, 9 – powietrze do wentylacji komory zapłonowej, 10 – wlot czynnika wentylującego, 11 – elementy grzejne

## Dodatek C

### Związek między prędkością propagacji płomienia a szybkością zmian ciśnienia wybuchu w zamkniętym zbiorniku

Prędkość propagacji płomienia należy do podstawowych parametrów charakteryzujących paliwo, dlatego w nauce o spalaniu dużo miejsca poświęca się metodom jej wyznaczania [97]. W jednej z metod wyznaczania normalnej prędkości propagacji płomienia w mieszkankach gazowych wykorzystuje się zmiany ciśnienia wybuchu w zamkniętym zbiorniku [118]. *Bradley i Mitcheson* dokonali przeglądu modeli matematycznych rozwoju wybuchu w kulistym zbiorniku wypełnionym gazową mieszkanką palną i przedstawili wyniki symulacji komputerowej z użyciem różnych modeli [98]. W modelach tych występują różne stopnie uproszczeń, ale najważniejszym założeniem jest przyjęcie, że front płomienia jest nieskończenie cienki. Porównanie wyników obliczeń numerycznych rozwoju wybuchu w sferycznym zbiorniku z użyciem tych formuł wskazuje, że pomiar ciśnienia wybuchu może służyć do wyznaczania prędkości propagacji laminarnego płomienia. Przykładem takiej formuły, przy założeniu  $\gamma_b = \gamma_u = \gamma$ , jest zależność [98]:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{3\gamma S_u p}{R} \frac{p_e^{\frac{2}{3\gamma}}}{p_o^{\frac{1}{\gamma}}} \left( p_e^{\frac{1}{\gamma}} - p_o^{\frac{1}{\gamma}} \right)^{\frac{1}{3}} \left( 1 - \left( \frac{p_o}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (C1)$$

Ze względów poznawczych i praktycznych próbuje się też wyznaczyć prędkość propagacji płomienia w mieszaninach pyłowo – powietrznych [99]. Jest to jednak zadanie znacznie trudniejsze niż dla mieszanek gazowych, ponieważ mieszaniny pyłowo – gazowe są zwykle turbulentne oraz nie można przyjąć, że grubość płomienia w nich jest nieskończenie mała.

*Dahoe* i inni [100] podjęli próbę określenia analitycznego związku między szybkością zmian ciśnienia w sferycznym zbiorniku i prędkością propagacji płomienia pyłowego. Punktem wyjścia do ich analizy była uproszczona relacja między parametrem  $K_{st}$  i prędkością propagacji płomienia  $S_u$  dla wybuchów gazowych:

$$K_{st} = (36\pi)^{\frac{1}{3}} (p_e - p_o) \left( \frac{p_e}{p_o} \right)^{\frac{1}{\gamma}} S_u \quad (C2)$$

W zastosowaniu do płomienia pyłowego przyjęto jednak, że grubość płomienia  $\delta$  jest skończona, a jego struktura jest trzystrefowa. W rezultacie, w powyższym wzorze należało zmodyfikować wartość współczynnika  $K_{st}$  zależnie od grubości płomienia  $\delta$  i wielkości zbiornika [100]:

$$K_{st}^* = \left( \frac{dp}{dt} \right)_{\max} V^{\frac{1}{3}} f\left( \frac{\delta}{R} \right) \quad (C3)$$

gdzie:

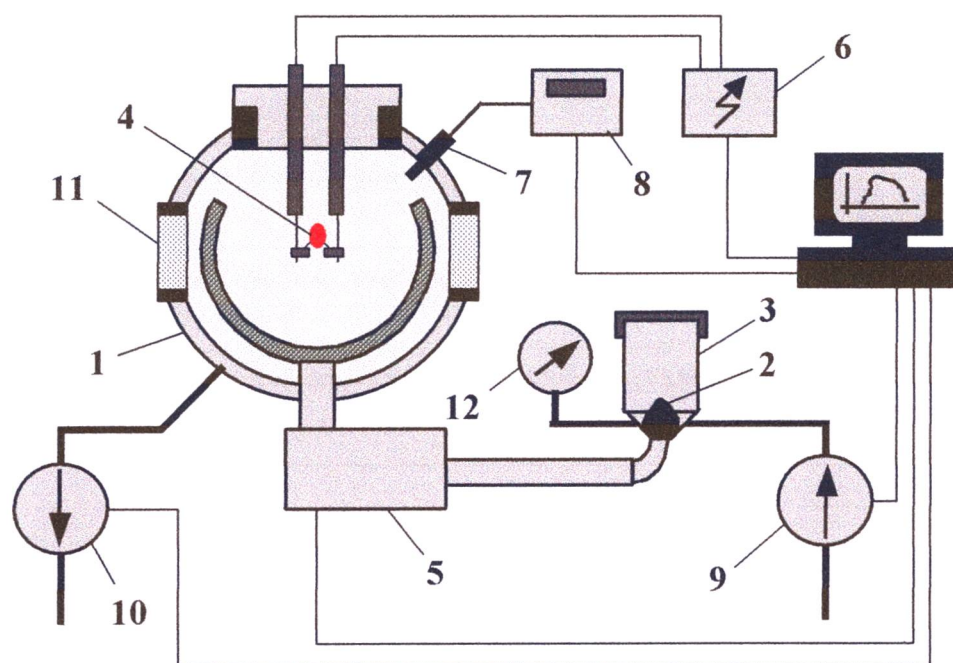
$$f\left( \frac{\delta}{R} \right) = \begin{cases} \exp\left( 6,44 \frac{\delta}{R} \right) & \text{gdy } \frac{\delta}{R} \leq 8\% \\ 5,84 \sqrt{\frac{\delta}{R}} & \text{gdy } \frac{\delta}{R} > 8\% \end{cases}$$

## Dodatek D

### Wyznaczanie współczynnika wybuchowości $K_{st}$

W celu określenia współczynnika wybuchowości  $K_{st}$  dla wybranych paliw stałych (węgiel kamienny, węgiel brunatny, pył drzewny i łupek powęglowy) niezbędne było wyznaczenie ich maksymalnej prędkości narostu ciśnienia  $(dp/dt)_{max}$ .

Badania prowadzono według standardowej procedury z wykorzystaniem 20l kulistej komory wybuchowej [1]. Charakterystyka użytych w badaniach paliw stałych została przedstawiona w tabeli 6.2. Schemat stanowiska do badania własności wybuchowych pyłów pokazano na rysunku D1.



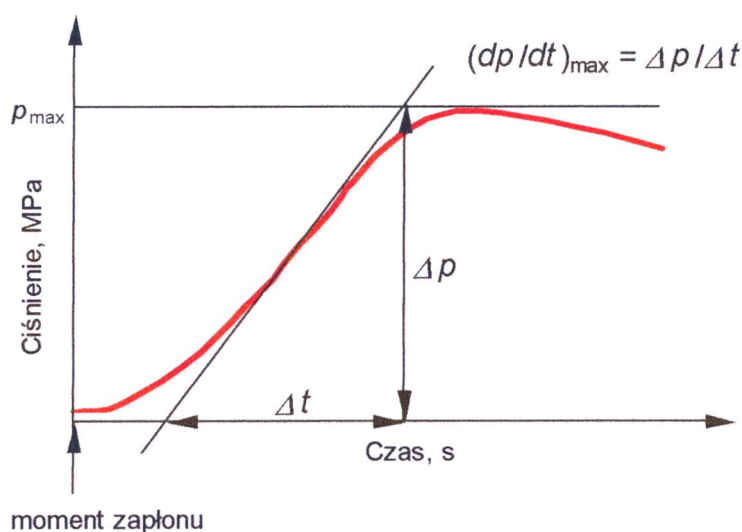
Rys. D1. Schemat stanowiska do wyznaczania własności wybuchowych pyłów

Badania realizowano w ten sposób, że do kulistej komory zapłonowej (1) wdmuchiwało się od dołu, za pomocą powietrza ze sprężarki (9), naważkę pyłu (2) zasypywaną do cylindra (3). Ciśnienie powietrza podmuchowego wynosiło 16 barów i było mierzone manometrem (12). Po rozpyleniu naważki pyłu (2) w komorze zapłonowej uruchamiano układ zapłonowy (6) do inicjacji wybuchu pyłowego. Źródłem jednopunktowego zapłonu była tabletkowa zapłonowa (4) o mocy 1 kJ. Parametry wybuchu pyłowego (maksymalne ciśnienie wybuchu  $p_{max}$  oraz prędkość narostu ciśnienia wybuchu  $(dp/dt)_{max}$ ) były mierzone za pomocą czujnika piezoelektrycznego (7) z kalibrowanym wzmacniaczem ładunku (8). Efekt świetlny procesu zapłonu i wybuchu był obserwowany przez wziernik (11). Oczyszczanie komory zapłonowej (1) odbywało się przy pomocy



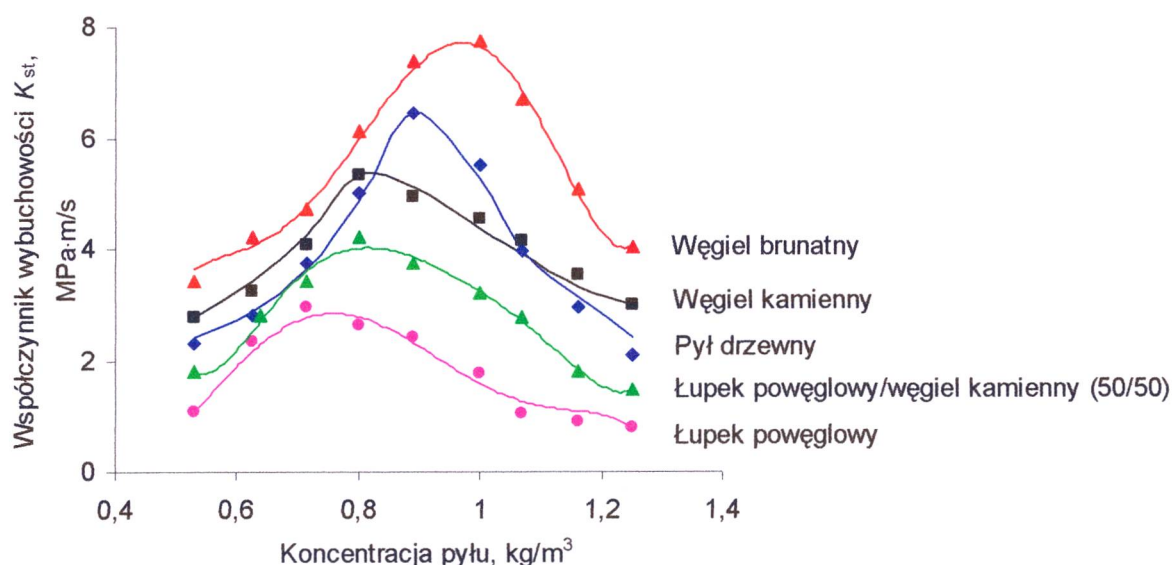
wentylatora wyciągowego. Do regulacji ciśnienia w komorze służyła pompa próżniowa (10). Do sterowania eksperymentem oraz rejestracji przebiegu ciśnienia wybuchu wykorzystano komputer PC wyposażony w specjalistyczną kartę analogowo – cyfrową. Komputer na podstawie przebiegu zmiany ciśnienia wybuchu w czasie (Rys. D2) obliczał maksymalną prędkość narostu tego ciśnienia  $(dp/dt)_{\max}$  oraz wartość współczynnika wybuchowości  $K_{st}$  według wzoru:

$$K_{st} = \left( \frac{dp}{dt} \right)_{\max} V^{\frac{1}{3}} \quad (A1)$$



Rys. D2. Przebieg ciśnienia w czasie wybuchu i wyznaczanie  $p_{\max}$  oraz  $(dp/dt)_{\max}$

Wyniki obliczeń wartości współczynnika wybuchowości  $K_{st}$  [2] przedstawiono na rysunku D3, a maksymalne jego wartości uzyskane dla przebadanych paliw stałych zawarto w tabeli 9.1.



Rys. D3. Wpływ koncentracji pyłu na wartość współczynnika wybuchowości  $K_{st}$

## ZESPÓŁ BADAWCZY:

1. Mgr inż. Arkadiusz DYJAKON

## ODBIORCY:

|                                                             |   |
|-------------------------------------------------------------|---|
| 1. Rada Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów ..... | 5 |
| 2. Komitet Badań Naukowych .....                            | 1 |
| 3. Biblioteka .....                                         | 1 |
| 4. Autor .....                                              | 1 |
| Razem                                                       | 8 |

Raport złożono  
w Dziale Wydawnictw I-20  
w czerwcu 2003 r.

